日　本　国　特　許　庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application:　２００３年　７月２５日

出願番号
Application Number:　特願２００３－２７９９５６

[ST. 10/C] :　［ＪＰ２００３－２７９９５６］

出願人
Applicant(s):　ソニー株式会社

２００３年１２月　２日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office　今井康夫

出証番号　出証特２００３－３０９９３０１

【書類名】　特許願
【整理番号】　0390458502
【提出日】　平成15年 7月25日
【あて先】　特許庁長官　今井　康夫　殿
【国際特許分類】　H01L 21/00
【発明者】
　【住所又は居所】　東京都品川区北品川６丁目７番３５号　ソニー株式会社内
　【氏名】　宇賀神　隆一
【特許出願人】
　【識別番号】　000002185
　【氏名又は名称】　ソニー株式会社
【代理人】
　【識別番号】　100082762
　【弁理士】
　【氏名又は名称】　杉浦　正知
　【電話番号】　03-3980-0339
【選任した代理人】
　【識別番号】　100120640
　【弁理士】
　【氏名又は名称】　森　幸一
【先の出願に基づく優先権主張】
　【出願番号】　特願2003- 48863
　【出願日】　平成15年 2月26日
【先の出願に基づく優先権主張】
　【出願番号】　特願2003-141659
　【出願日】　平成15年 5月20日
【手数料の表示】
　【予納台帳番号】　043812
　【納付金額】　21,000円
【提出物件の目録】
　【物件名】　特許請求の範囲　1
　【物件名】　明細書　1
　【物件名】　図面　1
　【物件名】　要約書　1
　【包括委任状番号】　0201252

【書類名】特許請求の範囲
【請求項１】
　量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域とが互いに隣接して設けられ、上記第１の領域と上記第２の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を有し、
　上記ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、上記第１の領域および上記第２の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する
　ことを特徴とする量子カオス装置。
【請求項２】
　上記ヘテロ接合に上記電界を印加するための電極を有することを特徴とする請求項１記載の量子カオス装置。
【請求項３】
　上記第１の領域が金属状態にあり、上記第２の領域がランダムな媒体を有することを特徴とする請求項１記載の量子カオス装置。
【請求項４】
　上記第１の領域が金属状態にあり、上記第２の領域にランダムな磁場が存在することを特徴とする請求項１記載の量子カオス装置。
【請求項５】
　上記第２の領域に磁性不純物が添加されていることを特徴とする請求項４記載の量子カオス装置。
【請求項６】
　上記ヘテロ接合の接合界面に沿う方向の最大寸法が電子のコヒーレンス長以下であることを特徴とする請求項１記載の量子カオス装置。
【請求項７】
　上記第１の領域および上記第２の領域が層状の形状を有することを特徴とする請求項１記載の量子カオス装置。
【請求項８】
　上記層状の形状を有する上記第１の領域および上記第２の領域の少なくとも一方に絶縁膜を介して上記ヘテロ接合に上記電界を印加するための電極が設けられていることを特徴とする請求項７記載の量子カオス装置。
【請求項９】
　上記電界の印加に加えて、上記電子系のフェルミ準位を所定の値に設定することにより、上記第１の領域および上記第２の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御することを特徴とする請求項１記載の量子カオス装置。
【請求項１０】
　上記電子系の密度を制御することによって上記フェルミ準位を所定の値に設定することを特徴とする請求項９記載の量子カオス装置。
【請求項１１】
　上記フェルミ準位の制御によって、量子カオスから可積分的系への転移が起こる臨界的電界強度が制御されていることを特徴とする請求項９記載の量子カオス装置。
【請求項１２】
　上記第１の領域と上記第２の領域との間のトランスファーが上記第１の領域内のトランスファーおよび上記第２の領域内のトランスファー以下であることを特徴とする請求項１記載の量子カオス装置。
【請求項１３】
　上記第１の領域と上記第２の領域との間にトンネルバリア領域が設けられていることを特徴とする請求項１２記載の量子カオス装置。
【請求項１４】
　上記第１の領域および上記第２の領域はそれぞれ半導体からなり、上記トンネルバリア

領域はその伝導帯の底のエネルギーが上記半導体の伝導帯の底のエネルギーよりも高い半導体からなることを特徴とする請求項１３記載の量子カオス装置。

【請求項１５】

上記第１の領域および上記第２の領域はそれぞれＧａＡｓまたはＩｎＧａＡｓからなり、上記トンネルバリア領域はＡｌＧａＡｓからなることを特徴とする請求項１３記載の量子カオス装置。

【請求項１６】

上記第２の領域の両側に上記第１の領域がそれぞれ設けられてダブルヘテロ接合が形成されていることを特徴とする請求項１記載の量子カオス装置。

【請求項１７】

上記第１の領域と上記第２の領域との間にそれぞれトンネルバリア領域が設けられていることを特徴とする請求項１６記載の量子カオス装置。

【請求項１８】

上記第１の領域および上記第２の領域はそれぞれ半導体からなり、上記トンネルバリア領域はその伝導帯の底のエネルギーが上記半導体の伝導帯の底のエネルギーよりも高い半導体からなることを特徴とする請求項１７記載の量子カオス装置。

【請求項１９】

上記第１の領域および上記第２の領域はそれぞれＧａＡｓまたはＩｎＧａＡｓからなり、上記トンネルバリア領域はＡｌＧａＡｓからなることを特徴とする請求項１７記載の量子カオス装置。

【請求項２０】

量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域とが互いに隣接して設けられ、上記第１の領域と上記第２の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を用い、

上記ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、上記第１の領域および上記第２の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御するようにした

ことを特徴とする量子カオスの制御方法。

【請求項２１】

上記電界の印加に加えて、上記電子系のフェルミ準位を所定の値に設定することにより、上記第１の領域および上記第２の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御することを特徴とする請求項２０記載の量子カオスの制御方法。

【請求項２２】

上記第１の領域と上記第２の領域との間のトランスファーが上記第１の領域内のトランスファーおよび上記第２の領域内のトランスファー以下であることを特徴とする請求項２０記載の量子カオスの制御方法。

【書類名】明細書
【発明の名称】量子カオス装置および量子カオスの制御方法
【技術分野】
【０００１】
この発明は、量子カオス装置および量子カオスの制御方法に関し、特に、新規な原理に基づいたものである。
【背景技術】
【０００２】
情報処理を担う物理系として、内在する非線形性は重要である。従来から用いられてきた素子として、ある程度の非線形な応答が見られる材料を用いた電子素子がある。例えば、電流－電圧特性に非線形性があるものとして、微分負抵抗を示す二端子素子が挙げられる。もちろん、三端子素子として、ＭＯＳ－ＦＥＴは現代の技術を支えている。そして、これらの非線形性を持つ電子素子を線形な電子回路で結合し、非線形性を持つ情報処理装置を構築することにより、任意の計算を実行することができる。
【０００３】
しかしながら、そのような電子回路では、高度に集積化することによる困難が問題になってきている。例えば、発熱の問題である。内在する電気抵抗に起因するこの発熱は、電子素子の非線形性を生み出すために必須であり、情報処理を実行するのに不可欠であって、本質的である。
【０００４】
この困難を回避するため、要素素子の非線形性を高めることで素子数を減らす試みがなされてきた。この方向を発展させると必然的に、要素素子がカオスを示す程に強い非線形性を持つものが望まれてくる。カオスを示す古典的な系を量子化したとき、その量子系の振る舞いを特徴付けるのが量子カオスである。
【０００５】
一方で、要素素子が微細化されて行くと、その素子に閉じ込められた電子は量子力学的粒子として振る舞うことになる。従って、この観点より、量子カオスを示す要素素子に期待が集まっている。
本発明者は、材料の持つ構造の変化によって、その構造中の電子系における量子カオスの制御が可能であることを理論的に示してきた。例えば、量子ドットの大きさを変化させることにより電子間相互作用の実効的大きさを調整することによる制御（非特許文献１）、フラクタル・アグリゲイト（fractal aggregate)におけるフラクタル次元を制御することによる制御（非特許文献２、３、４）、多重化階層構造における構造制御（非特許文献５）、などが可能なものとして挙げられる。
【０００６】
【非特許文献１】R.Ugajin,Physica A 237,220(1997)
【非特許文献２】R.Ugajin,S.Hirata,and Y.Kuroki,Physica A 278,312(2000)
【非特許文献３】R.Ugajin,Phys.Lett.A 277,267(2000)
【非特許文献４】R.Ugajin,Physica A 301,1(2001)
【非特許文献５】R.Ugajin,J.Nanotechnol.1,227(2001)
【０００７】
さらに、本発明者は、ある種の量子ドットを集合させたアレーにおいて、モット金属－絶縁体転移を、電界効果によって制御し得ることを理論的に示してきた（非特許文献６、７、８、９）。一方で、不純物散乱が激しい層と高純度で不純物散乱が非常に少ない層との結合系に電界を印加することによって、その系の伝導性を制御することができることが示されている（非特許文献１０、１１）。
【非特許文献６】R.Ugajin,J.Appl.Phys.76,2833(1994)
【非特許文献７】R.Ugajin,Physica E 1,226(1997)
【非特許文献８】R.Ugajin,Phys.Rev.B 53,10141(1996)
【非特許文献９】R.Ugajin,J.Phys.Soc.Jpn.65,3952(1996)

【非特許文献１０】H.Sakaki,Jpn.J.Appl.Phys.21,L381(1982)
【非特許文献１１】K.Hirakawa,H.Sakaki,and J.Yoshino,Phys.Rev.Lett.54,1279(1985)
【０００８】
なお、量子準位統計量を用いて量子カオスが発生しているかどうかを検知できることが報告されている（非特許文献１２、１３）。
【非特許文献１２】L.E.Reichl,The transition to chaos:in conservative classical systems:quantum manifestations(Springer,New York,1992)
【非特許文献１３】F.Haake,Quantum Signatures of chaos,(Springer-Verlag,1991)
また、量子カオス性の変調を定量的に調べるためのパラメータとして、Berry-Robnikパラメータρが知られており（非特許文献１４）、準古典近似の範囲でρは位相空間における正則領域の体積比であることが知られている（非特許文献１５）。
【非特許文献１４】M.V.Berry and M.Robnik,J.Phys.A(Math.Gen.)17,2413(1984)
【非特許文献１５】B.Eckhardt,Phys.Rep.163,205(1988)
なお、安定同位体の中性子による核反応により半導体へドーピングを行う手法である中性子転換ドーピング（Neutron Transmutation Doping, ＮＴＤ）が開発されている（非特許文献１６）。
【非特許文献１６】K.M.Itoh,E.E.Haller,W.L.Hansen,J.W.Beeman,J.W.Farmer,A.Rudnev, A.Tikhomirov,and V.I.Ozhogin,Appl.Phys.Lett.64,2121(1994)
【発明の開示】
【発明が解決しようとする課題】
【０００９】
しかしながら、上述の従来の量子カオス発生方法では、量子カオス性を制御することができる範囲は狭い範囲に限定されていたため、より広範囲に量子カオス性を制御することができる技術が求められていた。また、量子カオス性の制御を簡便に行うためには、外部から量子カオス性を制御することができることが望ましい。
【００１０】
従って、この発明が解決しようとする課題は、量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができる量子カオス装置および量子カオスの制御方法を提供することにある。
この発明が解決しようとする他の課題は、単一の材料を用いても、量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができる量子カオス装置および量子カオスの制御方法を提供することにある。
【課題を解決するための手段】
【００１１】
本発明者は、従来技術が有する上記の課題を解決するために鋭意検討を行った結果、量子カオスを示す金属状態の領域と、可積分性を有するアンダーソン局在状態を持つ領域とが結合した結合構造において、電界効果によって、この構造に閉じ込められた電子系の量子カオス性を従来より広範囲に、しかも外部から制御することができ、しかも単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能であることを見出した。
【００１２】
一方、マンガン（Ｍｎ）などの磁性不純物の添加により実現可能なランダム磁場によって、より強い非線形性を持つＧＵＥ（Gaussian unitary ensemble)量子カオスが発生することが知られているが、本発明者は、強い非線形性を持つＧＵＥ量子カオスを示す金属状態の領域と、可積分性を有するアンダーソン局在状態を持つ領域とが結合した結合構造において、電界効果によって、この構造に閉じ込められた電子系の量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができ、しかも単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能であることを見出した。
【００１３】
この発明は、上記の知見に基づいてさらに考察を行った結果、案出されたものである。
すなわち、上記課題を解決するために、この発明の第１の発明は、

量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域とが互いに隣接して設けられ、第１の領域と第２の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を有し、
そのヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第１の領域および第２の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する
ことを特徴とする量子カオス装置である。
【００１４】
この発明の第２の発明は、
量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域とが互いに隣接して設けられ、第１の領域と第２の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を用い、
そのヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第１の領域および第２の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御するようにした
ことを特徴とする量子カオスの制御方法である。
【００１５】
この発明において、「ヘテロ接合」とは、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域とが互いに隣接（あるいは接触）することにより形成される接合であるが、これは電子系の性質が互いに異なる二つの領域が互いに隣接することにより形成される接合を意味し、同種の材料を用いるものであっても、異種材料を用いるものであってもよい。このヘテロ接合における電子系をヘテロティック（heterotic)相と呼ぶ。第２の領域の両側に第１の領域をそれぞれ設けて、言い換えれば、第２の領域を二つの第１の領域で挟んでダブルヘテロ接合を形成してもよい。同様に、第１の領域の両側に第２の領域をそれぞれ設けて、言い換えれば、第１の領域を二つの第２の領域で挟んでダブルヘテロ接合を形成してもよい。このダブルヘテロ接合における電子系をダブルヘテロティック（double heterotic）相と呼ぶ。
【００１６】
ヘテロ接合の材料としては基本的にはどのような種類のものを用いてもよいが、具体的には、例えば半導体（ＳｉやＧｅなどの元素半導体、ＧａＡｓ、ＧａＰ、ＧａＮなどのＩＩＩ－Ｖ族化合物半導体、ＺｎＳｅなどのＩＩ－ＶＩ族化合物半導体など）である。第１の領域および第２の領域は、典型的には結晶からなり、一般的には層状の形状を有する。より具体的には、ヘテロ接合は、例えば、各種の結晶成長法を用いて第１の領域となる結晶層および第２の領域となる結晶層を成長させることにより形成される。第１の領域および第２の領域の境界部には遷移領域が存在する場合もあるが、この場合でも必要な物性を発現させる上で基本的な相違はない。
【００１７】
典型的には、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域は金属状態にあり、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域はランダム（乱雑）な媒体を有し、あるいはランダム磁場が存在する。ランダムな媒体は、ランダムなポテンシャルが電子に働くものであれば、基本的にはどのようなものであってもよいが、典型的には不純物や格子欠陥などである。また、ランダム磁場は、典型的にはＭｎなどの磁性不純物の添加により発生する。
このヘテロ接合においては、量子カオス発現の観点より、好適には、接合界面に沿う方向の最大寸法を電子のコヒーレンス長以下とする。
【００１８】
ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加するためには、一般的にはこのヘテロ接合に電界印加用の電極が設けられる。例えば、ヘテロ接合を構成する第１の領域および第２の領域の少なくとも一方に電極が設けられる。この場合、電極の電気的絶縁のために、これらの電極は絶縁膜を介して設ける。特に、上記のように第１の領

域および第２の領域が層状の形状を有する場合には、これらの第１の領域および第２の領域の少なくとも一方に絶縁膜を介して電極が設けられる。

量子カオス装置においては、必要に応じて、上記のヘテロ接合および電極に加えて、電気信号の入出力のための配線が設けられる。

【００１９】

上記の電界の印加、言い換えると電界効果による量子カオス性の制御は、同時にアンダーソン転移、すなわち金属／絶縁体転移を伴うが、第１の領域と第２の領域との間のトランスファーを第１の領域内のトランスファーおよび第２の領域内のトランスファー以下とすることにより、好適には第１の領域と第２の領域との間のトランスファーを第１の領域内のトランスファーおよび第２の領域内のトランスファーより充分に小さく（例えば、２／３以下程度）することにより、電界効果によりアンダーソン転移を急峻に起こさせることができる。トランスファーを上記のように設定するためには、例えば、第１の領域と第２の領域との間にトンネルバリア領域が設けられる。このような構造の典型的な例を挙げると、第１の領域および第２の領域がそれぞれＧａＡｓからなり、トンネルバリア領域がＡｌＧａＡｓからなる場合である。また、より高い温度において好適にこの発明の効果を発現させるための構造としては、例えば、第１の領域および第２の領域がそれぞれＩｎＧａＡｓからなり、トンネルバリア領域がＡｌＧａＡｓからなるより大きなバンドオフセットを有する材料を用いたものが有効である。

【００２０】

この発明においては、電子系のフェルミ準位の制御によって、量子カオスから可積分的系への転移が起こる臨界的電界強度を制御することができる。従って、上記の電界の印加に加えて、電子系のフェルミ準位を所定の値に設定することによって、この電子系の量子カオス性をより広範囲に制御することができる。電子系のフェルミ準位の制御は電子系の密度の制御によって行うことができる。

【００２１】

上述のように構成されたこの発明によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域とからなるヘテロ接合に電界を印加することによって、これらの第１の領域および第２の領域からなる系の電子系を、典型的な量子カオスを示す状態からアンダーソン局在を示す状態まで自在に制御することができる。また、これはヘテロ接合の形成に用いる材料の種類によらない。さらに、電界の印加に加えてフェルミ準位の制御を併用することにより、量子カオス性をより広範囲に制御することができる。また、第１の領域と第２の領域との間のトランスファーを第１の領域内のトランスファーおよび第２の領域内のトランスファー以下とすることにより、アンダーソン転移を急峻に起こさせることができる。

【発明の効果】

【００２２】

この発明によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域とを、それらの間で電子の授受が可能な状態で互いに隣接して設けることによりヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、これらの第１の領域および第２の領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも外部から制御することができ、また、単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能である。また、トランスファーの適切な設定により、アンダーソン転移を急峻に起こさせることができる。また、電界印加に加えて電子系のフェルミ準位の制御を併用することによって、電子系の量子カオス性をより広範囲に制御することができる。また、ダブルヘテロティック相の採用により、電子系の量子カオス性をさらに広範囲に制御することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【００２３】

以下、この発明の実施形態について説明する。

第１の実施形態

この第１の実施形態においては、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置について説明する。

【００２４】

この第１の実施形態を説明する前に、二次元の正方格子上の電子、より詳細には二次元ランダムポテンシャル中の電子状態について説明する。

いま、図１に示すように、一辺がＬサイトからなる正方格子を考える。図１において、各格子点を黒丸で示す。この正方格子のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数１】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数２】

$$\hat{H}_2$$

は以下のように定義される。

【数３】

$$\hat{H}_2 = -t \sum_{\langle p,q \rangle} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \text{H.C.} \qquad (1)$$

ただしここで、〈ｐ，ｑ〉は最近接サイトを意味する。また、ｔはトランスファーである。ランダムポテンシャルはv_pによって導入される。ここで、v_pは

【数４】

$$-V/2 < v_p < V/2 \qquad (2)$$

により生成されるランダム変数である。ランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。

【００２５】

Ｖ／ｔが充分大きければアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。Ｖ／ｔが充分小さければ、金属状態のフェルミ液体となる。無限の二次元系では、ランダムポテンシャルの強度がどれほど小さくても、ゼロでなければ、すべての一電子状態は局在することが知られている。しかしながら、有限の局在長を有するのであるから、ここで考えている系のサイズ（格子点間距離をａとするとＬａ）より局在長が長ければ、この有限領域内では金属的な状態として振る舞う。

【００２６】

ハミルトニアン

【数５】

$$\hat{H}_2$$

の固有エネルギーを

【数６】

$$\epsilon_m$$

、固有ベクトルを｜ｍ〉と書くと、

【数７】

$$\hat{H}_2|m\rangle = \epsilon_m|m\rangle \qquad (3)$$

である。ただし、ｍ＝０，１，２，・・・，ｎである。

【００２７】

まず、ｎ＋１個の量子準位

【数８】

ϵ_m

を、その最近接準位間間隔が平均で１になるように規格化する。つまり、

【数９】

$$\omega_j = \epsilon_j - \epsilon_{j-1} \qquad (4)$$

とする。ただし、ｊ＝１，２，・・・，ｎとしたとき、

【数１０】

$$\overline{\omega} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_j \qquad (5)$$

を用い、新しい準位

【数１１】

$$\varepsilon_0 = 0 \qquad (6)$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{\overline{\omega}}\sum_{j=1}^{m}\omega_j = \sum_{j=1}^{m}\Omega_j \qquad (7)$$

へ変換する。ここで、

【数１２】

$$\Omega_j = \frac{\omega_j}{\overline{\omega}} \qquad (8)$$

である。系の状態密度（the density of states)は

【数１３】

$$\rho(\epsilon) = \frac{1}{n+1}\sum_{m=0}^{n}\delta(\epsilon - \varepsilon_m) \qquad (9)$$

で定義され、その積分（the staircase function)

【数１４】

$$\lambda(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\epsilon} d\eta\, \rho(\eta) \qquad (10)$$

を計算する。得られたstaircase functionは、アンフォールディング（unfolding)という操作を用いることにより、平均して状態密度が一定になるように変換される。このようにして得られた量子準位を用い、量子準位統計量として最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）とダイソンとメータのΔ_3統計量を計算する。上記非特許文献１２，１３に記載されているように、これらの統計量を用いることで、量子カオスが発生しているかどうかを検知することができる。量子カオス系は、古典的カオス系と同様に外部からの摂動に対して敏感であることも知られており、非線形材料設計の指針として量子カオス解析は重要である。

【００２８】

可積分系の場合、最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）とΔ_3統計量はPoisson 分布のもの

【数１５】

$$P_{\mathrm{P}}(s) = \mathrm{e}^{-s} \qquad (11)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{n}{15} \qquad (12)$$

で良く記述され、量子カオス系の場合、ＧＯＥ（Gaussian orthogonal ensemble）分布のもの

【数１６】

$$P_{\mathrm{GOE}}(s) = \frac{\pi s}{2} e^{-\pi s^2/4} \quad (13)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{1}{\pi^2}\left[\log(2\pi n) + \gamma - \frac{\pi^2}{8} - \frac{5}{4}\right] + \mathrm{O}(n^{-1}) \quad (14)$$

で良く記述される。ここで、γ はオイラー定数である。

【００２９】

以下に示す数値計算ではＬ＝４０とし、周期的境界条件を用いることにする。全状態数はL^2 ＝１６００である。量子準位はｎ＝２０１からｎ＝８００のものを利用した。ｔ＝１を固定し、Ｖを調整して量子カオス性を制御する。

【００３０】

図２に最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）を、図３にΔ_3 統計量を示した。ＶとしてＶ＝２，６，１０，１４，１８，２２を用いた。Ｖ＝２の場合、系の量子準位統計はＧＯＥのもので良く記述され、金属的な量子カオス状態であることが分かる。一方で、Ｖ＝２２の場合、系の量子準位統計はPoisson 分布のもので良く記述され、アンダーソン局在状態（可積分系）であることが分かる。Ｖ＝２からＶ＝２２の変化に伴って、量子カオス系から可積分系への変化が見られている。

【００３１】

さて、この第１の実施形態による量子カオス装置について説明する。

図４に示すように、一辺がＬサイトからなる正方格子を二層考える。これらの二層によりヘテロ接合が形成されている。これらの層の最大寸法（格子点間距離をａとすると√２Ｌａ）は、電子のコヒーレンス長以下である。第１層のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数１７】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。また、第２層のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数１８】

$$\hat{d}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数１９】

$$\hat{H}$$

は以下のように定義される。

【数２０】

$$\hat{H} = -t_1 \sum_{\langle p,q\rangle} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q - t_2 \sum_{\langle p,q\rangle} \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_q - t_3 \sum_p \hat{c}_p^\dagger \hat{d}_p + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \sum_p w_p \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p + \frac{\phi}{2}\sum_p (\hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p - \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p) + \mathrm{H.C.} \quad (15)$$

ただしここで、〈ｐ，ｑ〉は各層内の最近接サイトを意味する。また、t_1 は第１層のトランスファー、t_2 は第２層のトランスファー、t_3 は第１層と第２層との間のトランスファーである。第１層のランダムポテンシャルはv_p によって導入される。ここで、v_p は

【数２１】

$$-V_1/2 < v_p < V_1/2 \quad (16)$$

により生成されるランダム変数である。また、第２層のランダムポテンシャルはw_p によって導入される。ここで、w_p は

【数２２】

$$-V_2/2 < w_p < V_2/2 \qquad (17)$$

により生成されるランダム変数である。これらのランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。

【００３２】

この場合、V_1 ／t_1 とV_2 ／t_2 との大小関係に応じて、第１層および第２層の一方が量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域あるいは可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域となり、他方が可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域あるいは量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域となる。例えば、V_1 ／t_1 ＜V_2 ／t_2 の場合には、第１の層が量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域、第２の層が可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域となる。

【００３３】

この場合、第１層の下側および第２層の上側に、少なくともこれらの層の全面を覆う大きさの電極（図示せず）がそれぞれ設けられている。そして、これらの電極間に電圧を印加することにより、それらを貫通するようにｚ軸方向の電界を均一に印加することができるようになっている。

【００３４】

まず、最も単純な場合である、t_3 ＝０の、第１層と第２層とが分離されている場合を考える。V_1 ／t_1 が充分に小さければ、第１層は金属状態のフェルミ液体となる。V_2 ／t_2 が充分に大きければ、第２層はアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。

次に、t_3 ＞０の場合を考える。この時、二つの層は量子的な結合をする。ϕは、二層間の平均的ポテンシャル差として導入されており、このパラメータが、これらの層を貫く電界の強度に比例することになる。ϕをパラメータとして系の量子状態がどのように変化していくかが問題となる。

【００３５】

以下に示す数値計算ではＬ＝４０とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は$2L^2$ ＝３２００である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、上述の方法により量子準位統計量を計算する。量子準位としてはｎ＝２０１からｎ＝８００のものを利用した。以下の計算では、t_1 ＝t_2 ＝１、t_3 ＝０．５、V_1 ＝２、V_2 ＝２０を固定し、ϕを調整して量子カオス性を制御する。

【００３６】

図５に最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）を、図６にΔ_3 統計量を示した。ϕの値としては、ϕ＝－４，－２．４，－０．８，０．８，２．４，４を用いた。ϕ＝－４の場合、電子はポテンシャルエネルギーの低い第１層に多くの振幅を持って存在する。この時、ＧＯＥ分布で良く記述される量子カオス状態になっている。ϕの増加に伴って、ランダムポテンシャルによる散乱の激しい第２層での振幅が増大し、量子準位統計は変化していく。ϕ＝４にまでなると、電子はポテンシャルエネルギーの低い第２層に多くの振幅を持って存在し、アンダーソン局在を起こして可積分的なPoisson 分布に従うことが分かる。

【００３７】

以上の解析から、ϕの変化、つまりこれらの二層を貫く電界強度の変化によって、この量子系の量子カオス性を制御することができることが分かる。

なお、伝導性に着目している範囲で、アンダーソン局在の状態と金属状態との切替えに関してはSakakiらによる議論がある（上記非特許文献１０、１１）。

【００３８】

図７にこの第１の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す。図７に示す

ように、この量子カオス装置においては、第１層としての結晶層１１と第２層としての結晶層１２とがトンネルバリアとしての結晶層１３を介して量子力学的に結合してヘテロ接合が形成されている。ここで、第１層としての結晶層１１はアンドープで高純度、第２層としての結晶層１２には不純物が高濃度（例えば（１～２）×10^{18} cm^{-3}）にドープされている。そして、結晶層１１の裏面に絶縁膜１４を介して電極１５が形成され、結晶層１２の上面に絶縁膜１６を介して電極１７が形成されている。

【００３９】

この量子カオス装置は、例えば次のようにして製造することができる。すなわち、図８Ａに示すように、基板１８上に結晶層１１、１３、１２を順次成長させる。結晶成長法としては、有機金属化学気相成長（ＭＯＣＶＤ）法や分子線エピタキシー（ＭＢＥ）法などを用いることができる。結晶層１２には、結晶成長の際に不純物を必要な量だけドープする。次に、結晶層１２上に絶縁膜１６を形成し、さらにその上に導電膜、例えば金属膜を形成して電極１７を形成する。次に、図８Ｂに示すように、基板１８を裏面研磨などにより除去する。次に、図８Ｃに示すように、露出した結晶層１１上に絶縁膜１４を形成し、さらにその上に導電膜、例えば金属膜を形成して電極１５を形成する。次に、この積層構造体をリソグラフィーおよびエッチングにより所定形状にパターニングする。以上により、図７に示す量子カオス装置が得られる。

【００４０】

材料の具体例を挙げると、結晶層１１としてアンドープＧａＡｓ層、結晶層１２としてＳｉドープＧａＡｓ層、結晶層１３としてアンドープＡｌＧａＡｓ層（Ａｌ組成は例えば０．３）、絶縁膜１４、１６としてSiO_2膜、電極１５、１７としてＡｌ膜、基板１８として半絶縁性ＧａＡｓ基板を用いる。

【００４１】

図９にこの第１の実施形態による量子カオス装置の他の構造例を示す。図９に示すように、この量子カオス装置においては、第１層としての結晶層２１と第２層としての結晶層２２とがトンネルバリアとしての結晶層２３を介して量子力学的に結合してヘテロ接合が形成されている。ここで、第１層としての結晶層２１には格子欠陥が実質的に存在せず（あるいは格子欠陥が極めて少ない）、第２層としての結晶層２２には格子欠陥が少なくとも結晶層２１よりも多く存在する。さらに、結晶層２１にはスペーサ層としての結晶層２４、電子供給層としての結晶層２５および絶縁層としての結晶層２６が順次接合され、結晶層２２には絶縁層としての結晶層２７が接合されている。そして、結晶層２６の裏面に電極２８が形成され、結晶層２７の上面に電極２９が形成されている。

この量子カオス装置の製造方法は、図７に示す量子カオス装置の製造方法とほぼ同様であるので説明を省略する。

【００４２】

材料の具体例を挙げると、結晶層２１、２２としてアンドープＧａＡｓ層、結晶層２３、２４、２６、２７としてアンドープＡｌＧａＡｓ層（Ａｌ組成は例えば０．３）、結晶層２５としてＳｉドープＡｌＧａＡｓ層（Ａｌ組成は例えば０．３）、電極２８、２９としてＡｌ膜を用いる。

【００４３】

この図９に示す量子カオス装置においては、結晶層２５から供給される電子が格子欠陥のない結晶層２１に存在する時、系は金属的に振る舞い、電極２８、２９間の電位差によって電子が格子欠陥のある結晶層２２に引き付けられると、系はアンダーソン局在相へと転移を起こす。

【００４４】

以上のように、この第１の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造する

ことができる。

【００４５】

第２の実施形態

この第２の実施形態による量子カオス装置は、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置であるが、この場合、ランダムポテンシャルを導入するための不純物として特に磁性不純物を用いる。

【００４６】

この第２の実施形態を説明する前に、二次元の正方格子上の電子、より詳細には二次元ランダムポテンシャル中の電子状態について説明する。

いま、図１に示すように、一辺がＬサイトからなる正方格子を考える。この正方格子のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数２３】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数２４】

$$\hat{H}_2$$

は以下のように定義される。

【数２５】

$$\hat{H}_2 = -\sum_{\langle p,q\rangle} t_{p,q}\hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \mathrm{H.C.} \qquad (18)$$

ただしここで、〈ｐ，ｑ〉は最近接サイトを意味する。ランダムポテンシャルはv_pによって導入される。ここで、v_pは

【数２６】

$$-V/2 < v_p < V/2 \qquad (19)$$

により生成されるランダム変数である。ランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。トランスファー$t_{p,q}$は

【数２７】

$$t_{p,q} = \exp(2\pi i\theta_{p,q}) \qquad (20)$$

であり、$\theta_{p,q}$は$\theta_{p,q} = -\theta_{q,p}$を満たし、$|\theta_{p,q}| < \xi/2$により生成されるランダム変数である。$\xi > 0$の時にランダム磁場が導入される。

【００４７】

Ｖが充分大きければアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。Ｖが充分小さければ、金属状態のフェルミ液体となる。すでに述べたように、無限の二次元系では、ランダムポテンシャルの強度がどれほど小さくても、ゼロでなければ、すべての一電子状態は局在することが知られている。しかしながら、有限の局在長を有するのであるから、ここで考えている系のサイズＬａより局在長が長ければ、この有限領域内では金属的な状態として振る舞う。

【００４８】

ハミルトニアン

【数２８】

$$\hat{H}_2$$

の固有エネルギーを

【数２９】

$$\epsilon_m$$

、固有ベクトルを｜ｍ〉と書くと、

【数３０】

$$\hat{H}_2|m\rangle = \epsilon_m|m\rangle \qquad (21)$$

である。ただし、ｍ＝０，１，２，・・・，ｎである。

【００４９】

まず、ｎ＋１個の量子準位

【数３１】

$$\epsilon_m$$

を、その最近接準位間間隔が平均で１になるように規格化する。つまり、

【数３２】

$$\omega_j = \epsilon_j - \epsilon_{j-1} \qquad (22)$$

とする。ただし、ｊ＝１，２，・・・，ｎとしたとき、

【数３３】

$$\overline{\omega} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_j \qquad (23)$$

を用い、新しい準位

【数３４】

$$\varepsilon_0 = 0 \qquad (24)$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{\overline{\omega}}\sum_{j=1}^{m}\omega_j = \sum_{j=1}^{m}\Omega_j \qquad (25)$$

へ変換する。ここで、

【数３５】

$$\Omega_j = \frac{\omega_j}{\overline{\omega}} \qquad (26)$$

である。系の状態密度は

【数３６】

$$\rho(\epsilon) = \frac{1}{n+1}\sum_{m=0}^{n}\delta(\epsilon - \varepsilon_m) \qquad (27)$$

で定義され、その積分

【数３７】

$$\lambda(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\epsilon} d\eta\, \rho(\eta) \qquad (28)$$

を計算する。得られたstaircase functionは、アンフォールディングという操作を用いることにより、平均して状態密度が一定になるように変換される。このようにして得られた量子準位を用い、量子準位統計量として最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）とダイソンとメータのΔ_3統計量を計算する。すでに述べたように、これらの統計量を用いることで、量子カオスが発生しているかどうかを検知することができる。

【００５０】

可積分系の場合、最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）とΔ_3統計量はPoisson 分布のもの

【数３８】

$$P_{\mathrm{P}}(s) = \mathrm{e}^{-s} \quad (29)$$
$$\Delta_3(n) = \frac{n}{15} \quad (30)$$

で良く記述され、量子カオス系の場合、ＧＵＥ（Gaussian unitary ensemble)分布のもの

【数３９】

$$P_{\mathrm{GUE}}(s) = \frac{32s^2}{\pi^2}\mathrm{e}^{-4s^2/\pi} \quad (31)$$
$$\Delta_3(n) = \frac{1}{2\pi^2}\left[\log(2\pi n) + \gamma - \frac{5}{4}\right] + \mathrm{O}(n^{-1}) \quad (32)$$

で良く記述される。ここで、γはオイラー定数である。

【００５１】

以下に示す数値計算ではＬ＝６０とし、周期的境界条件を用いることにする。全状態数はL^2＝３６００である。量子準位はｎ＝２０１からｎ＝１８００のものを利用した。ξ＝０．１を固定し、Ｖを調整して量子カオス性を制御する。

【００５２】

図１０に最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）を、図１１にΔ_3 統計量を示した。ＶとしてＶ＝２，６，１０，１４，１８，２２を用いた。Ｖ＝２の場合、系の量子準位統計はＧＯＥのものでほぼ記述され、金属的な量子カオス状態であることが分かる。詳しく見てみると、量子カオス系からのずれが見てとれる。これは、系が二次元であるため、アンダーソン局在の影響が出ているからである。一方で、Ｖ＝２２の場合、系の量子準位統計はPoisson 分布のもので良く記述され、アンダーソン局在状態（可積分系）であることが分かる。Ｖ＝２からＶ＝２２の変化に伴って、量子カオス系から可積分系への変化が見られている。

【００５３】

さて、この第２の実施形態による量子カオス装置について説明する。

第１の実施形態と同様に、図４に示すように、一辺がＬサイトからなる正方格子を二層考える。これらの二層によりヘテロ接合が形成されている。これらの層の最大寸法（格子点間距離をａとすると√２Ｌａ）は、電子のコヒーレンス長以下である。第１層のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数４０】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。また、第２層のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数４１】

$$\hat{d}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数４２】

$$\hat{H}$$

は以下のように定義される。

【数４３】

$$\hat{H} = -\sum_{\langle p,q\rangle} t^{(1)}_{p,q}\hat{c}^{\dagger}_{p}\hat{c}_{q} - \sum_{\langle p,q\rangle} t^{(2)}_{p,q}\hat{d}^{\dagger}_{p}\hat{d}_{q} - \sum_{p} t^{(3)}_{p}\hat{c}^{\dagger}_{p}\hat{d}_{p} + \sum_{p} v_p\hat{c}^{\dagger}_{p}\hat{c}_{p} + \sum_{p} w_p\hat{d}^{\dagger}_{p}\hat{d}_{p} + \frac{\phi}{2}\sum_{p}(\hat{c}^{\dagger}_{p}\hat{c}_{p} - \hat{d}^{\dagger}_{p}\hat{d}_{p}) + \mathrm{H.C.} \quad (33)$$

ただしここで、＜ｐ，ｑ＞は各層内の最近接サイトを意味する。第１層のランダムポテンシャルはv_pによって導入される。ここで、v_pは

【数４４】

$$-V_1/2 < v_p < V_1/2 \quad (34)$$

により生成されるランダム変数である。また、第２層のランダムポテンシャルはw_pによって導入される。ここで、w_pは

【数４５】

$$-V_2/2 < w_p < V_2/2 \quad (35)$$

により生成されるランダム変数である。これらのランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。トランスファー

【数４６】

$t^{(1)}_{p,q}$、$t^{(2)}_{p,q}$、$t^{(3)}_{p}$

は

【数４７】

$$t^{(1)}_{p,q} = t_1 \exp(2\pi i\theta^{(1)}_{p,q}) \quad (36)$$

$$t^{(2)}_{p,q} = t_2 \exp(2\pi i\theta^{(2)}_{p,q}) \quad (37)$$

$$t^{(3)}_{p} = t_3 \exp(2\pi i\theta^{(3)}_{p}) \quad (38)$$

であり、

【数４８】

$\theta^{(1)}_{p,q} = -\theta^{(1)}_{q,p}$、$\theta^{(2)}_{p,q} = -\theta^{(2)}_{q,p}$

を満たし、

【数４９】

$|\theta^{(1)}_{p,q}| < \xi/2$、$|\theta^{(2)}_{p,q}| < \xi/2$、$|\theta^{(3)}_{p}| < \xi/2$

により生成されるランダム変数である。$\xi > 0$の時にランダム磁場が導入される。

【００５４】

まず、最も単純な場合である、$t_3 = 0$の、第１層と第２層とが分離されている場合を考える。V_1 / t_1が充分小さければ、第１層は金属状態のフェルミ液体となる。V_2 / t_2が充分大きければ、第２層はアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。

次に、t_3＞の場合を考える。この時、これらの二つの層は量子的な結合をする。ϕは、二層間の平均的ポテンシャル差として導入されており、このパラメータが、これらの層を貫く電界に比例することになる。ϕをパラメータとして系の量子状態がどのように変化していくかが問題となる。

【００５５】

以下に示す数値計算ではＬ＝６０とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全

状態数は$2L^2$＝７２００である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、上述の方法により量子準位統計量を計算する。量子準位としてはｎ＝２０１からｎ＝１８００のものを利用した。以下の計算では、$t_1=t_2=1$、$t_3=0.5$、$V_1=1$、$V_2=12$、$\xi=0.1$を固定し、ϕを調整して量子カオス性を制御する。

【００５６】

図１２に最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）を、図１３にΔ_3統計量を示した。ϕの値としては、$\phi=-4, -2.4, -0.8, 0.8, 2.4, 4$を用いた。$\phi=-4$の場合、電子はポテンシャルエネルギーの低い第１層に多くの振幅を持って存在する。この時、ＧＵＥ分布で良く記述される量子カオス状態になっている。ϕの増加に伴って、ランダムポテンシャルによる散乱の激しい第２層での振幅が増大し、量子準位統計は変化していく。$\phi=4$にまでなると、電子はポテンシャルエネルギーの低い第２層に多くの振幅を持って存在し、アンダーソン局在を起こして可積分的なPoisson 分布に従うことが分かる。

【００５７】

以上の解析から、ϕの変化、つまりこれらの二層を貫く電界強度の変化によって、この量子系の量子カオス性を制御することができることが分かる。

上記以外のことは、第１の実施形態と同様である。

【００５８】

以上のように、この第２の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させ、またランダムポテンシャルの導入に磁性不純物の添加を用いてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

【００５９】

<u>第３の実施形態</u>

この第３の実施形態による量子カオス装置は、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置であるが、この場合、量子カオス性の制御に、電界強度の変化に加えて、電子系のフェルミ準位の設定を用いる。

この量子カオス装置の構成は、電子系のフェルミ準位が所定の値に設定されていることを除いて、第１の実施形態による量子カオス装置の構成と同様である。

【００６０】

第１の実施形態で述べた方法により量子準位統計量を計算する。以下に示す数値計算ではＬ＝８０とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は$2L^2$＝１２８００である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、量子準位統計量を計算する。以下の計算では、$t_1=t_2=1$、$t_3=0.5$、$V_1=2$、$V_2=20$を固定し、ϕを調整して量子カオス性を制御する。

【００６１】

まず、量子準位としてｎ＝２０１からｎ＝３２００のものを利用した計算例を示す。図１４に最近接準位間間隔分布Ｐ（ｓ）を、図１５にΔ_3統計量を示した。ϕの値としては、$\phi=-6, -3.6, -1.2, 1.2, 3.6, 6$を用いた。$\phi=6$の場合、電子はポテンシャルエネルギーの低い第２層に多くの振幅を持って存在し、アンダーソン局在を起こして可積分的なPoisson 分布に従うことが分かる。ϕの減少に伴って、ランダムポテンシャルによる散乱が比較的弱い第１層に大きな振幅を持つようになり、量子準位統計は変化していく。$\phi=-6$にまでなると、金属的であり、ＧＯＥ分布で良く記述される量子カオス状態になる。

【００６２】

以上の解析から、ϕの変化、つまりこれらの二層を貫く電界強度の変化によって、この量子系の量子カオス性を制御することができることが分かる。

さて、この量子カオス性の変調を定量的に調べるため、Berry-Robnikパラメータρを導

入する（非特許文献１４）。まず、

【数５０】

$$\overline{\rho} = 1 - \rho$$

としたとき、

【数５１】

$$P_2(s,\rho) = \rho^2 e^{-\rho s} \mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}\overline{\rho}s}{2}\right) + \left(2\rho\overline{\rho} + \frac{\pi\overline{\rho}^3 s}{2}\right) e^{-\rho s - \pi\overline{\rho}^2 s^2/4} \quad (39)$$

を導入する。ただし、

【数５２】

$$\mathrm{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty d\tau\, e^{-\tau^2} \quad (40)$$

を用いた。この関数P_2（ｓ，ρ）は、ρ＝１の時Poisson 分布のＰ（ｓ）と一致し、ρ＝０の時ＧＯＥ分布のＰ（ｓ）と一致する。つまり、ρを０から１へと変化させることで、量子カオス系から可積分系までの量子準位統計を内挿することができる。さて、Berry-Robnikパラメータとは、数値計算によって得られたＰ（ｓ）を、上記P_2（ｓ，ρ）で最適に近似した場合のρの値である。準古典近似の範囲でρは、位相空間における正則領域（可積分系とそれから摂動展開可能な領域）の体積比である（非特許文献１５）。従って、ここで議論しているアンダーソン局在系においては、局在状態の体積比とみなすことができる。

【００６３】

上記の系におけるBerry-Robnikパラメータを図１６に示す。ϕの大きな領域でBerry-Robnikパラメータが大きな値を取り、局在性が大きいことを示している。ϕの減少に伴いBerry-Robnikパラメータは減少し、ϕ＝－２においてはほぼρ＝０に到達し、系が量子カオス的性質を示すことを意味している。

さて、このデータはｎ＝２０１からｎ＝３２００の広いエネルギー領域に関する平均的な性質を表すものであった。

【００６４】

ここで、電子系のフェルミ準位の設定による量子カオスの制御のために、量子準位統計のエネルギー依存性を詳しく検討する。図１７に、ｎ＝２０１からｎ＝１２００までの１０００状態を用いて量子準位統計を計算した後、Berry-Robnikパラメータを決定したもの、同様にｎ＝１２０１からｎ＝２２００までの１０００状態を用いた場合、ｎ＝２２０１からｎ＝３２００までの１０００状態を用いた場合を示す。この三例から明らかなように、２０１－１２００の比較的低いエネルギーの状態を解析した場合は、比較的小さなϕの値においても大きなBerry-Robnikパラメータが得られており、量子局在の性質が見られている。１２０１－２２００のエネルギーへ進むと、アンダーソン転移が起きるϕがより大きくなり、その傾向は２２０１－３２００のエネルギーにおいてより顕著である。

【００６５】

この結果を電子系に当てはめた場合、電極間に印加する電圧などを制御することによって、この系の電子系のフェルミ準位がｎ＝２０１からｎ＝１２００の間に位置する場合、電子系の応答は図１７の２０１－１２００のデータによって良く記述されるであろう。また、この系の電子系のフェルミ準位がｎ＝１２０１からｎ＝２２００の間に位置する場合、電子系の応答は図１７の１２０１から２２００のデータによって良く記述されるであろう。そして、この系の電子系のフェルミ準位がｎ＝２２０１からｎ＝３２００の間に位置する場合、電子系の応答は図１７の２２０１から３２００のデータによって良く記述されるであろう。このことから、低いエネルギーにおいてより局在傾向が大きいのであり、電子系のフェルミ準位を制御することにより、電界効果によるアンダーソン転移の起こる臨界的な電位ϕ_c、つまり電界強度を制御することができることが分かる。

上記以外のことは、第１の実施形態と同様である。

【００６６】

以上のように、この第３の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することに加えて、この系の電子系のフェルミ準位をこの電子系の密度の制御により所定の値に設定することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性をより広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

【００６７】

第４の実施形態

この第４の実施形態による量子カオス装置は、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置であるが、この場合、両領域内のトランスファーに比べて両領域間のトランスファーを小さく設定することにより、量子カオスに伴うアンダーソン転移が急峻に起こるようにする。

この量子カオス装置の構成は、上記のようにトランスファーが設定されていることを除いて、第１の実施形態による量子カオス装置の構成と同様である。

【００６８】

第１の実施形態で述べた方法により量子準位統計量を計算し、量子カオス性の変調を定量的に調べるためにBerry-Robnikパラメータρを導入する。以下に示す数値計算では$L=80$とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は$2L^2=12800$である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、量子準位統計量を計算する。以下の計算では、$t_1=t_2=1$、$V_1=2$、$V_2=20$を固定し、ϕを調整して量子カオス性を制御する。$t_3=1/2, 1, 2, 4, 8$を用いた。量子準位としては$n=1201$から$n=3200$のものを利用した。Berry-Robnikパラメータを図１８に示す。図１８において$t_3=1/2$を見ると、ϕの大きな領域でBerry-Robnikパラメータが大きな値を取り、局在性が大きいことを示している。ϕの減少に伴いBerry-Robnikパラメータは減少し、$\phi=-2$においてはほぼ$\rho=0$に到達し、系が量子カオス的性質を示すことを意味している。t_3が大きくなるにつれて、変調性が乏しくなることが分かる。特に$t_3=4$程度以上では、ϕに対する関数形が変わり、線形的になっているのが分かる。

【００６９】

ここで、無限系のアンダーソン転移を復習する。純粋な二次元系では、絶対零度において、ランダムポテンシャルの強度がどれほど弱くてもゼロでない限り、全ての一電子量子状態が局在して系は常に絶縁体として振る舞う。有限温度においては、コヒーレンス長が有限になるため、伝導性が生じるが、ランダムポテンシャルの弱い領域（弱局在領域）において、量子位相干渉効果による伝導度の補正項は、ランダムポテンシャル強度に依存しないことが知られている。さてこの系に戻って考えると、t_3が充分大きい場合、第１層と第２層との結合状態と反結合状態とが互いに充分分離することになる。このとき、例えばフェルミ準位が結合状態に位置していたとすれば、この結合状態は純粋な二次元量子極限と考えることができる。電界効果によりランダムポテンシャル強度は変調されるが、この電子状態への影響が小さいことが、上記の議論から予想される。t_3が小さくなるに従って、第１層と第２層との量子状態が混じって純粋な二次元系ではなくなってくると、急峻な金属／絶縁体の相転移が見られるのである。この場合、$t_1=1$、$t_2=1$であった。従って、両層のバンド幅はそれぞれ４であって、これに比べて充分小さいt_3の時に、急峻なアンダーソン転移が見られる。

【００７０】

次に、Inverse participation ratio （逆関与率）による解析について説明する。

アンダーソン転移の解析において、従来からしばしば用いられるInverse participation ratio とは、以下に定義される量である。

【数５３】

$$\alpha_m = \sum_{\mathbf{r}} |\phi_m(\mathbf{r})|^4 \tag{41}$$

ここで、

【数５４】

$$\phi_m(\mathbf{r})$$

は固有エネルギー

【数５５】

$$\epsilon_m$$

の波動関数であり、ｒは格子点を示す。つまり、ｍ番目のエネルギー固有状態の波動関数を四乗して空間積分したものである。ランダムポテンシャル強度が空間的に一定である場合、この量を解析することによって、系のアンダーソン転移の様子が分かる。簡単にその理由を見ると次のとおりである。局在状態の典型として体積がωの領域Ω内に局在している波動関数として

【数５６】

$$\phi_m(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1/\sqrt{\omega} & \text{when } \mathbf{r} \in \Omega \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{42}$$

を考える。このときInverse participation ratio は

【数５７】

$$\alpha_m = \int_\Omega dV \frac{1}{\omega^2} = \frac{1}{\omega} \tag{43}$$

となる。従って、局在している体積に反比例し、金属状態になるとゼロへと漸近する量である。

【００７１】

この量をこの系において計算する。ここではＬ＝４０とし、$N=2\times40^2=3200$が総状態数となる。α_m そのものは分布しているので、この量をエネルギーのウインドウ内で平均化した量を定義して解析することが便利である。

【００７２】

【数５８】

$$\alpha(E,W) = \frac{1}{\mu(E,W)} \sum_{m\in\Omega(E,W)} \alpha_m \tag{44}$$

を導入する。ここで、

【数５９】

$$\Omega(E,W) = \{m | E - W/2 < \epsilon_m < E + W/2\} \tag{45}$$

である。これはつまり、エネルギー固有値

【数６０】

$$\epsilon_m$$

がＥを中心に幅Ｗの間に入る状態を意味し、その状態数をμ（Ｅ，Ｗ）と書くことにする。ここでは、Ｗ＝０．４を用いた。

【００７３】

図１９には$t_3=1/2$の場合、図２０には$t_3=1$の場合、図２１には$t_3=2$の場合、図２２には$t_3=4$の場合、図２３には$t_3=8$の場合を示した。これらの図では、$\phi=-6$、$\phi=-4$、$\phi=-2$、$\phi=0$、$\phi=2$、$\phi=4$、$\phi=6$を用いた。それぞれ順番に０．４ずつ、縦方向にずらして表現してある。急峻な相転移が見られる図１９の場合

、α（Ｅ，Ｗ）がほぼゼロを示す領域が存在して、その領域がϕとともに移動することにより、金属／絶縁体の相転移が発生している。一方で、t_3 が大きい場合、α（Ｅ，Ｗ）がほぼゼロをとる領域そのものがなくなり、常に局在的な傾向を全てのエネルギー領域において見てとることができる。これは二次元量子極限の効果と考えることができる。

【００７４】

図２４に、t_3 の小さな物理系としての量子カオス装置の具体例を示す。

図２４に示すように、この量子カオス装置においては、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる絶縁層３１、例えばＧａＡｓからなる局在層３２、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる障壁層（トンネルバリア）３３、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる伝導層３４および例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる絶縁層３５が順次積層されており、下から順にＡｌＧａＡｓ／ＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓのヘテロ接合が形成されている。ここで、局在層３２においては不純物の添加や格子欠陥の導入などによりランダムポテンシャルが導入されているが、その他の層にはランダムポテンシャルは導入されていないか、導入されていても無視することができるレベルである。この局在層３２は、ランダムポテンシャルの導入を格子欠陥の導入により行う場合には、アンドープとすることができる。この局在層３２はアンダーソン局在を示す層であり、伝導層３４は金属的状態を示す層である。また、伝導層３４を構成するＡｌＧａＡｓのＡｌ組成は、この伝導層３４の伝導帯の底（下端）のエネルギーが局在層３２の伝導帯の底のエネルギーより少し高いが、障壁層３３および絶縁層３５の伝導帯の底のエネルギーより充分に低くなるように選ばれる。図示は省略するが、絶縁層３５上および絶縁層３１の裏面にそれぞれ電極が形成されており、これらの電極間に電圧を印加することにより、ｚ軸方向の電界を印加することができるようになっている。

図２５に、この量子カオス装置のヘテロ界面に垂直な方向のエネルギーバンド図を示す。図２５において、E_c は伝導帯の底のエネルギー、E_v は価電子帯の頂上（上端）のエネルギーを示す（以下同様）。

【００７５】

以上のように、この第４の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させてヘテロ接合を形成し、この際、両領域間のトランスファーが両領域内のトランスファーより小さく、好適には充分に小さくなるようにし、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性およびアンダーソン転移をより広範囲にしかも簡便に制御することができ、また、急峻にアンダーソン転移を起こさせることができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

【００７６】

第５の実施形態

この第５の実施形態による量子カオス装置は、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、その両側の、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるダブルヘテロ接合を用いた量子カオス装置である。

図２６に示すように、一辺がＬサイトからなる正方格子を三層考える。これらの三層によりダブルヘテロ接合が形成されている。これらの層の最大寸法（格子点間距離をａとすると$\sqrt{2}La$）は、電子のコヒーレンス長以下である。第１層のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数６１】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。また、第２層のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数６２】

$$\hat{d}_p^\dagger$$

を定義する。また、第３層のｐ番目の格子点に量子を生成する演算子

【数６３】

$$\hat{e}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数６４】

$$\hat{H}$$

は以下のように定義される。

【数６５】

$$\begin{aligned}\hat{H} &= -t_1\sum_{\langle p,q\rangle}\hat{c}_p^\dagger\hat{c}_q - t_2\sum_{\langle p,q\rangle}\hat{d}_p^\dagger\hat{d}_q - t_3\sum_{\langle p,q\rangle}\hat{e}_p^\dagger\hat{e}_q - t_{12}\sum_p\hat{c}_p^\dagger\hat{d}_p - t_{23}\sum_p\hat{d}_p^\dagger\hat{e}_p \\ &+ \sum_p u_p\hat{c}_p^\dagger\hat{c}_p + \sum_p v_p\hat{d}_p^\dagger\hat{d}_p + \sum_p w_p\hat{e}_p^\dagger\hat{e}_p + \frac{\phi}{2}\sum_p(\hat{e}_p^\dagger\hat{e}_p - \hat{c}_p^\dagger\hat{c}_p) + \mathrm{H.C.} \qquad (46)\end{aligned}$$

ただしここで、〈ｐ，ｑ〉は各層内の最近接サイトを意味する。また、t_1 は第１層のトランスファー、t_2 は第２層のトランスファー、t_3 は第３層のトランスファー、t_{12}は第１層と第２層との間のトランスファー、t_{23}は第２層と第３層との間のトランスファーである。第１層のランダムポテンシャルはu_p によって導入される。ここで、u_p は

【数６６】

$$-V_1/2 < u_p < V_1/2 \qquad (47)$$

により生成されるランダム変数である。第２層のランダムポテンシャルはv_p によって導入される。ここで、v_p は

【数６７】

$$-V_2/2 < v_p < V_2/2 \qquad (48)$$

により生成されるランダム変数である。また、第３層のランダムポテンシャルはw_p によって導入される。ここで、w_p は

【数６８】

$$-V_3/2 < w_p < V_3/2 \qquad (49)$$

により生成されるランダム変数である。これらのランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。

【００７７】

$t_{12}=0$の場合、第１層と第２層とは互いに分離されている。$t_{23}=0$の場合、第２層と第３層とは互いに分離されている。これらの三層が互いに分離されている場合、V_j/t_j が充分に小さければ、第ｊ層は金属状態のフェルミ液体となる。一方、この量が充分に大きければ、アンダーソン局在を起こし絶縁状態となっているであろう。

次に$t_{12}>0$、$t_{23}>0$の場合を考える。このとき、三つの層は量子的な結合をする。ϕは、第１層と第３層との平均的ポテンシャル差として導入されており、このパラメータが、この三重層を貫く電界に比例することになる。ϕをパラメータとして、系の量子状態がどのように変化していくかが問題となる。

【００７８】

第４の実施形態と同様な手法により、ここで考えている系においてInverse participation ratio を計算する。ここでは$L=40$とし、$N=3\times40^2=4800$が総状態数となる。状態数μ（Ｅ，Ｗ）は状態密度に比例する量であるので、

【数６９】

$$D(E,W)=\mu(E,W)/\mu_{\max} \qquad (50)$$

を導入する。ただし、規格化のために、

【数７０】

$$\mu_{\max} = \max_{E} \mu(E, W) \quad (51)$$

を導入した。以下では、W＝０．４を用いて計算を行った。

【００７９】

以下に示す数値計算では、各層には周期的境界条件を用いることにする。数値対角化によりエネルギー固有値、固有関数を求め、上で論じた方法によりα（E，W）、D（E，W）を計算する。以下の計算では、$t_1 = t_2 = t_3 = 1$、$t_{12} = t_{23} = 0.5$を用いている。

【００８０】

典型的な、$V_1 = 2$、$V_2 = 20$、$V_3 = 2$の場合について、図２７には１－α（E，W）を、図２８にはD（E，W）を示した。これらの図では、ϕ＝－１６、ϕ＝－１２、ϕ＝－８、ϕ＝－４、ϕ＝０、ϕ＝４、ϕ＝８、ϕ＝１２、ϕ＝１６を用いた。このとき、系は伝導層／局在層／伝導層の三重構造をなしている。それぞれ順番に１．２ずつ、縦方向にずらして表現してある。図２７から分かるように、１－α（E，W）がほぼ１となる領域が存在している。この領域では、金属的量子状態が出現している。この領域がϕとともに移動することにより、急峻な金属／絶縁体の相転移が発生している。図２８より、この金属的量子状態が出現しているエネルギー領域ではD（E，W）が大きな値をとっていることが分かる。このダブルヘテロティック構造の場合、二箇所にこの金属的状態が出現する。従って、上記の三重構造によって、より広範囲の電子系における量子状態制御が可能であることが示された。

【００８１】

補足として$V_1 = 20$、$V_2 = 2$、$V_3 = 20$の場合について、図２９に１－α（E，W）を、図３０にD（E，W）を示した。このとき、系は局在層／伝導層／局在層の三重構造をなしている。１－α（E，W）がほぼ１となるエネルギー領域、つまり金属的量子状態はバンドセンターに出現する。そして、この領域はϕに依存しない。金属量子状態で重要な働きをする伝導層は中央に位置し、ϕの影響を受けないからである。

【００８２】

図３１に、上記の伝導層／局在層／伝導層の三重構造を有する量子カオス装置の具体例を示す。

図３１に示すように、この量子カオス装置においては、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる絶縁層４１、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる伝導層４２、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる障壁層４３、例えばＩｎＧａＡｓからなる局在層４４、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる障壁層４５、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる伝導層４６および例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる絶縁層４７が順次積層されており、下から順にＡｌＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＩｎＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓのヘテロ接合が形成されている。ここで、局在層４４においては不純物の添加や格子欠陥の導入などによりランダムポテンシャルが導入されているが、その他の層にはランダムポテンシャルは導入されていないか、導入されていても無視することができるレベルである。この局在層４４は、ランダムポテンシャルの導入を格子欠陥の導入により行う場合には、アンドープとすることができる。この局在層４４はアンダーソン局在を示す層であり、伝導層４２、４６は金属的状態を示す層である。また、伝導層４２、４６を構成するＡｌＧａＡｓのＡｌ組成は、障壁層４３、４５および絶縁層４１、４７の伝導帯の底のエネルギーより充分に低くなるように選ばれる。図示は省略するが、絶縁層４７上および絶縁層４１の裏面にそれぞれ電極が形成されており、これらの電極間に電圧を印加することにより、ｚ軸方向の電界を印加することができるようになっている。

図３２に、この量子カオス装置のヘテロ界面に垂直な方向のエネルギーバンド図を示す。

【００８３】

図３３に、局在層／伝導層／局在層の三重構造を有する量子カオス装置の具体例を示す。

図３３に示すように、この量子カオス装置においては、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる絶縁層５１、例えばＩｎＧａＡｓからなる局在層５２、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる障壁層５３、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる伝導層５４、例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる障壁層５５、例えばＩｎＧａＡｓからなる局在層５６および例えばアンドープＡｌＧａＡｓからなる絶縁層５７が順次積層されており、下から順にＡｌＧａＡｓ／ＩｎＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓ／ＩｎＧａＡｓ／ＡｌＧａＡｓのヘテロ接合が形成されている。ここで、局在層５２、５６においては不純物の添加や格子欠陥の導入などによりランダムポテンシャルが導入されているが、その他の層にはランダムポテンシャルは導入されていないか、導入されていても無視することができるレベルである。これらの局在層５２、５６は、ランダムポテンシャルの導入を格子欠陥の導入により行う場合には、アンドープとすることができる。これらの局在層５２、５６はアンダーソン局在を示す層であり、伝導層５４は金属的状態を示す層である。また、伝導層５４を構成するＡｌＧａＡｓのＡｌ組成は、障壁層５３、５５および絶縁層５１、５７の伝導帯の底のエネルギーより充分に低くなるように選ばれる。図示は省略するが、絶縁層５７上および絶縁層５１の裏面にそれぞれ電極が形成されており、これらの電極間に電圧を印加することにより、ｚ軸方向の電界を印加することができるようになっている。

図３４に、この量子カオス装置のヘテロ界面に垂直な方向のエネルギーバンド図を示す。

【００８４】

以上のように、この第５の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域の両側に可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域を結合させてダブルヘテロ接合を形成し、このダブルヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性をさらに広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

【００８５】

<u>第６の実施形態</u>

この第６の実施形態においては、図３１に示す積層構造を有する量子カオス装置をＧｅ系材料を用いて構成する例およびその製造方法について説明する。

この量子カオス装置においては、例えばアンドープ$Si_x Ge_{1-x}$（０＜ｘ＜１）からなる絶縁層４１、例えばアンドープ$Si_y Ge_{1-y}$（０≦ｙ＜ｘ）からなる伝導層４２、例えばアンドープ$Si_z Ge_{1-z}$（ｙ＜ｚ＜１）からなる障壁層４３、例えば不純物としてＡｓがドープされたＧｅからなる局在層４４、例えばアンドープ$Si_z Ge_{1-z}$（ｙ＜ｚ＜１）からなる障壁層４５、例えばアンドープ$Si_y Ge_{1-y}$（０＜ｙ＜ｘ）からなる伝導層４６および例えばアンドープ$Si_x Ge_{1-x}$（０＜ｘ＜１）からなる絶縁層４７が互いに格子整合した状態で順次積層されており、下から順にＳｉＧｅ／ＳｉＧｅ／ＳｉＧｅ／Ｇｅ／ＳｉＧｅ／ＳｉＧｅ／ＳｉＧｅのヘテロ接合が形成されている。ここで、局在層４４においてはＧｅに不純物としてＡｓが添加されてランダムポテンシャルが導入されているが、その他の層にはランダムポテンシャルは導入されていないか、導入されていても無視することができるレベルである。この局在層４４はアンダーソン局在を示す層であり、伝導層４２、４６は金属的状態を示す層である。

【００８６】

次に、この量子カオス装置を中性子転換ドーピング（ＮＴＤ）（非特許文献１６）を利用して製造する方法について説明する。

まず、ＧｅについてこのＮＴＤを説明する。Ｇｅには安定な同位体が存在し、それぞれの存在比は^{70}Ｇｅが２０％、^{72}Ｇｅが２７％、^{73}Ｇｅが８％、^{74}Ｇｅが３７％、^{76}Ｇｅが８％程度である。このなかで、例えば^{70}Ｇｅは中性子の衝突により核反応を起こし、電子

を吸収することによって安定核^{71}Ｇａへと変化することができる。また、^{74}Ｇｅは中性子と核反応を起こし、β崩壊を伴うことで^{75}Ａｓへと変化することができる。従って、これらの同位体を含むＧｅ結晶を中性子に晒し、結晶内のＧｅ原子核に上述の核反応を起こさせることにより、結晶内のＧｅ原子を^{71}Ｇａや^{75}Ａｓを核とする原子へ変換することができる。この方法によれば、結晶格子の格子位置を占める原子を置換することなく、これらの元素によるドーピングが可能になる。この方法は、極めて均一なドーピングができることが知られている。

【００８７】

さて、この量子カオス装置を製造するためには、まず、図示省略した所定の基板上に、絶縁層４１としてアンドープ$Si_x{}^{72}Ge_{1-x}$層、伝導層４２としてアンドープ$Si_y{}^{72}Ge_{1-y}$層、障壁層４３としてアンドープ$Si_z{}^{72}Ge_{1-z}$層、局在層４４としてアンドープ^{74}Ｇｅ層、障壁層４５としてアンドープ$Si_z{}^{72}Ge_{1-z}$層、伝導層４６としてアンドープ$Si_y{}^{72}Ge_{1-y}$層および絶縁層４７としてアンドープ$Si_z{}^{72}Ge_{1-z}$層を順次エピタキシャル成長させる。

【００８８】

次に、このようにして成長された積層構造体に対し、中性子のエネルギーが揃った、すなわち単色の中性子線を照射する。この結果、中性子が照射されたアンドープ^{74}Ｇｅ層の一部の^{74}Ｇｅが中性子の衝突により核反応を起こして^{75}Ａｓに転換する。核反応が起きる確率は入射中性子線の強度に比例するため、入射中性子線の強度に比例する濃度で^{75}Ａｓが生成される。^{75}Ａｓは^{74}Ｇｅ層に対してｎ型不純物として働くため、中性子が照射された^{74}Ｇｅ層にｎ型不純物として^{75}Ａｓがドーピングされたことになる。^{75}Ａｓの濃度、すなわちドーピング濃度は、入射中性子線の強度などにより所望の値に制御することが可能である。$Si^{72}Ge$に中性子線が照射されても核反応が起こらないため、^{74}Ｇｅ層にのみ^{75}Ａｓがドーピングされる。

以上により、目的とするＧｅ系量子カオス装置が製造される。

【００８９】

この第６の実施形態によれば、第５の実施形態と同様な利点に加えて次のような利点を得ることができる。すなわち、Ａｓがドープされたゲからなる局在層４４の形成にＮＴＤを用いていることから、熱拡散やイオン注入を用いてドーピングを行う場合と異なり、原理的にドーピングの際に結晶欠陥の発生を伴わないため、局在層４４の結晶性が損なわれることがなく、特性の良好な量子カオス装置を製造することができる。

【００９０】

以上、この発明の実施形態につき具体的に説明したが、この発明は、上述の実施形態に限定されるものではなく、この発明の技術的思想に基づく各種の変形が可能である。

例えば、上述の実施形態において挙げた数値、構造、形状、材料などはあくまでも例に過ぎず、必要に応じてこれらと異なる数値、構造、形状、材料などを用いてもよい。

また、第６の実施形態において用いたＮＴＤの手法は、ダブルヘテロ接合の形成だけでなく、シングルヘテロ接合の形成にも適用することができることは言うまでもない。

さらに、第６の実施形態において、ＮＴＤの手法を障壁層４３、４５にも適用することにより、変調ドーピングを行うことが可能である。すなわち、障壁層４３、４５としてアンドープ$Si_z{}^{72}Ge_{1-z}$層の代わりにアンドープ$Si_z{}^{74}Ge_{1-z}$層を成長させた後、このアンドープ$Si_z{}^{74}Ge_{1-z}$層に単色の中性子線を照射してその一部の^{74}Ｇｅを^{75}Ａｓに転換することによりｎ型不純物の変調ドーピングを行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【００９１】

【図１】二次元ランダムポテンシャル中の電子状態を説明するための略線図である。

【図２】図１に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図３】図１に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図４】この発明の第１の実施形態による量子カオス装置の要部を模式化して示す略線図である。
【図５】この発明の第１の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図６】この発明の第１の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図７】この発明の第１の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す断面図である。
【図８】この発明の第１の実施形態による量子カオス装置の製造方法を説明するための断面図である。
【図９】この発明の第１の実施形態による量子カオス装置の他の構造例を示す断面図である。
【図１０】図１に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１１】図１に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１２】この発明の第２の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１３】この発明の第２の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１４】この発明の第３の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１５】この発明の第３の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１６】この発明の第３の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１７】この発明の第３の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１８】この発明の第４の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図１９】この発明の第４の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図２０】この発明の第４の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図２１】この発明の第４の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図２２】この発明の第４の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図２３】この発明の第４の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図２４】この発明の第４の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す斜視図である。
【図２５】この発明の第４の実施形態による量子カオス装置のエネルギーバンド図である。
【図２６】この発明の第５の実施形態による量子カオス装置の要部を模式化して示す略線図である。
【図２７】この発明の第５の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。
【図２８】この発明の第５の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図２９】この発明の第５の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図３０】この発明の第５の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図３１】この発明の第５の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す断面図である。

【図３２】この発明の第５の実施形態による量子カオス装置のエネルギーバンド図である。

【図３３】局在層／伝導層／局在層の三層構造を有する量子カオス装置の具体的な構造例を示す断面図である。

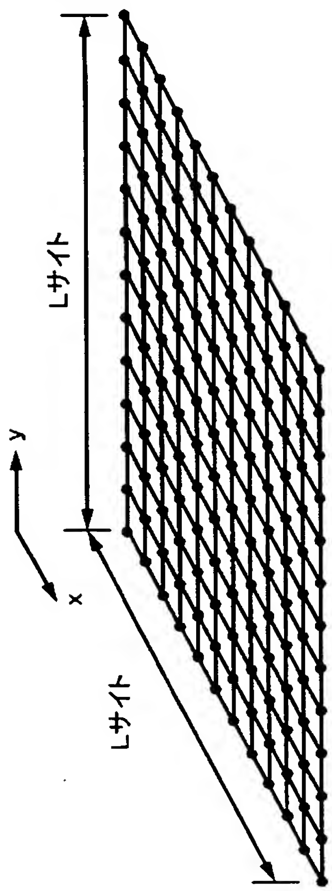
【図３４】図３３に示す量子カオス装置のエネルギーバンド図である。

【符号の説明】

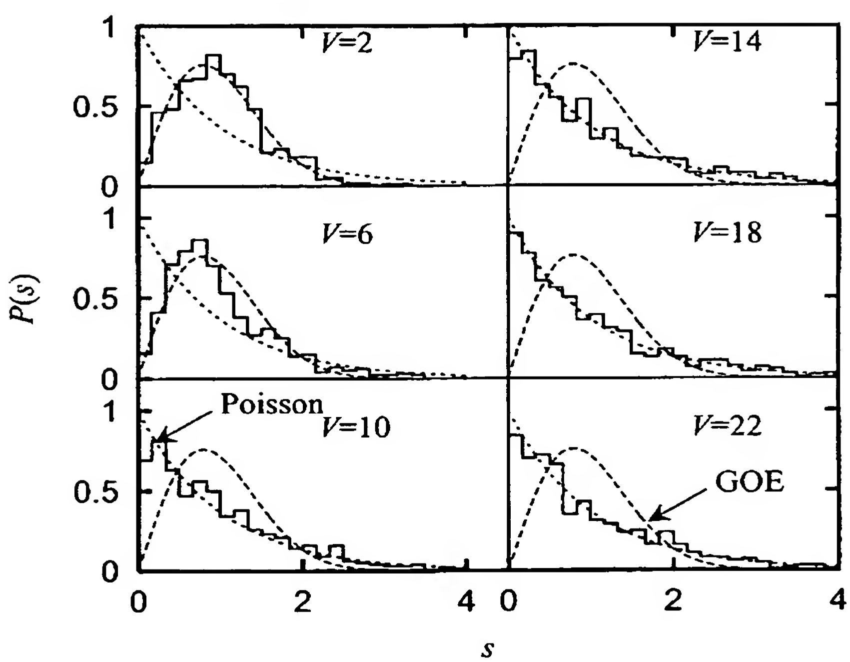
【００９２】

１１、１２、１３…結晶層、１４、１６…絶縁膜、１５、１７…電極、１８…基板、２１～２７…結晶層、２８、２９…電極、３１、３５、４１、４７…絶縁層、３２、４２、４６…局在層、３３、４３、４５…障壁層、３４、４４…伝導層

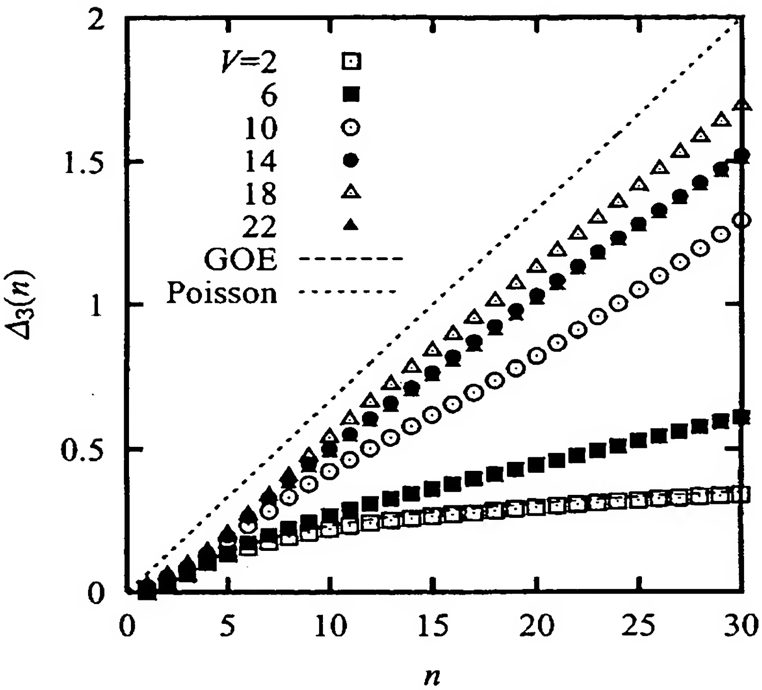
【書類名】図面
【図１】



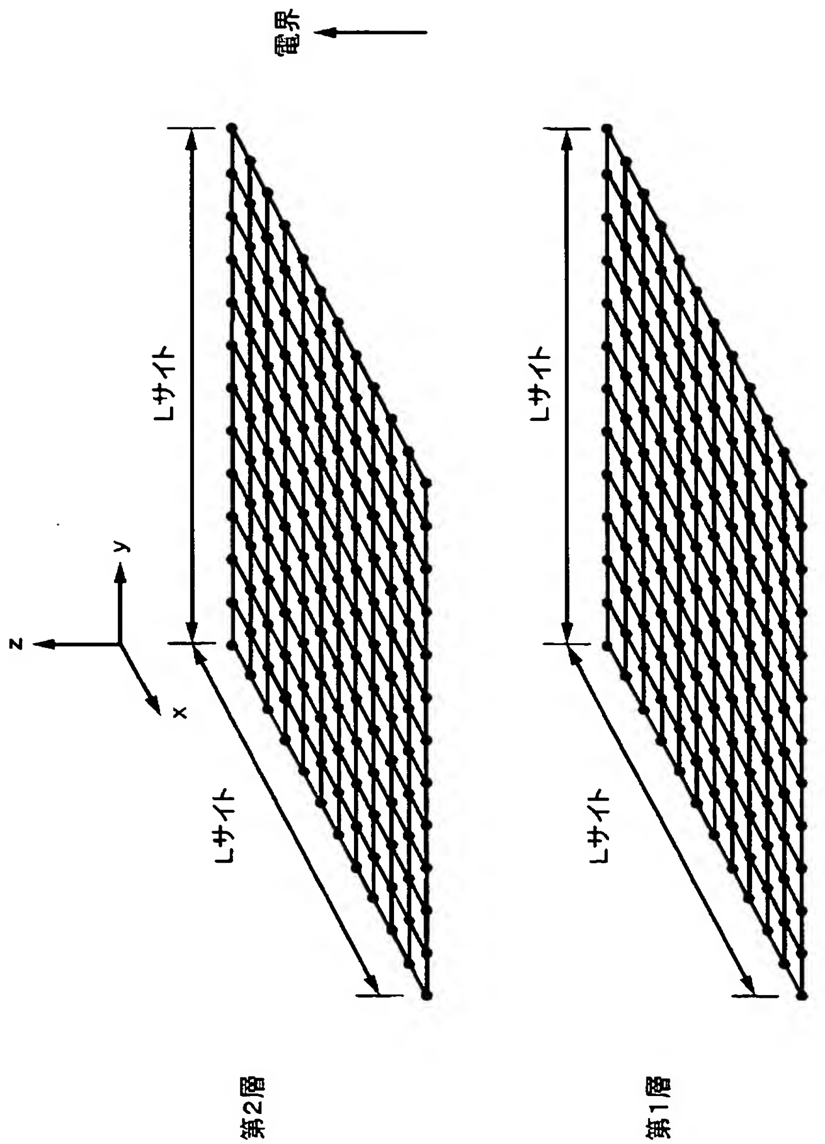
【図２】



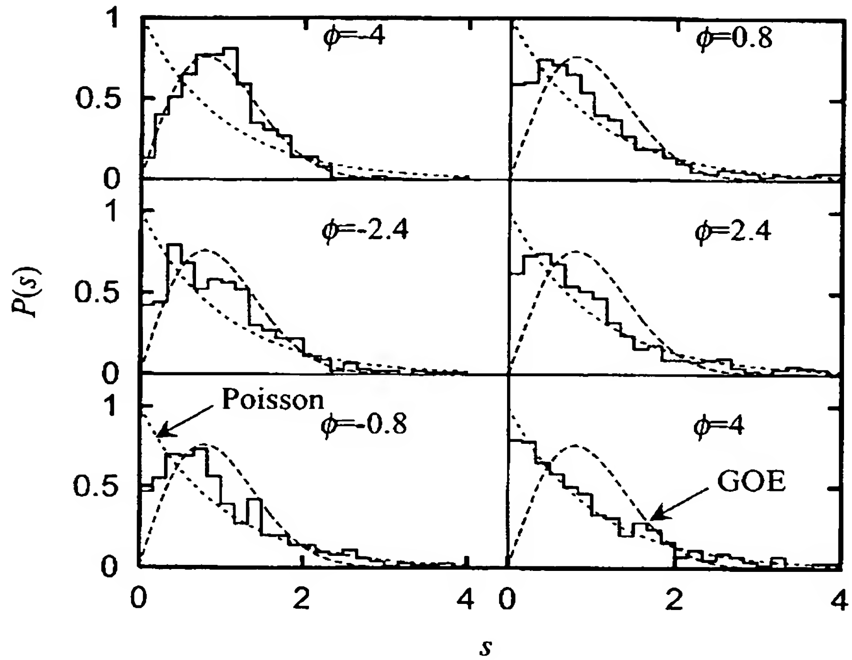
【図３】



【図４】

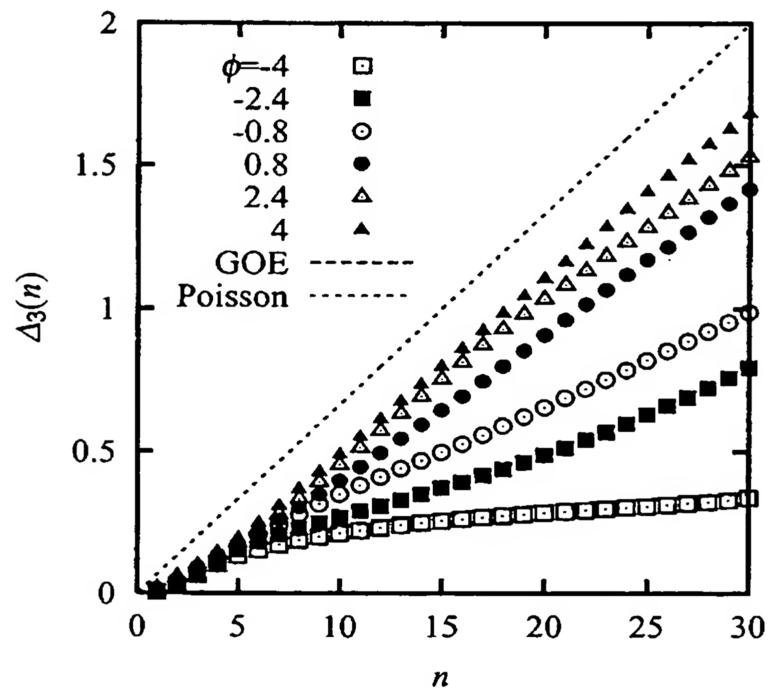


【図５】



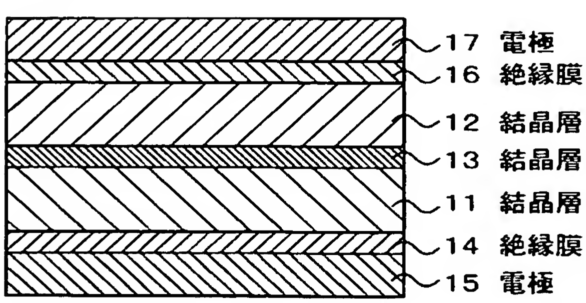
φ=-4
φ=0.8
φ=-2.4
φ=2.4
φ=-0.8
φ=4
Poisson
GOE
P(s)
s
0
0.5
1
2
4

【図６】



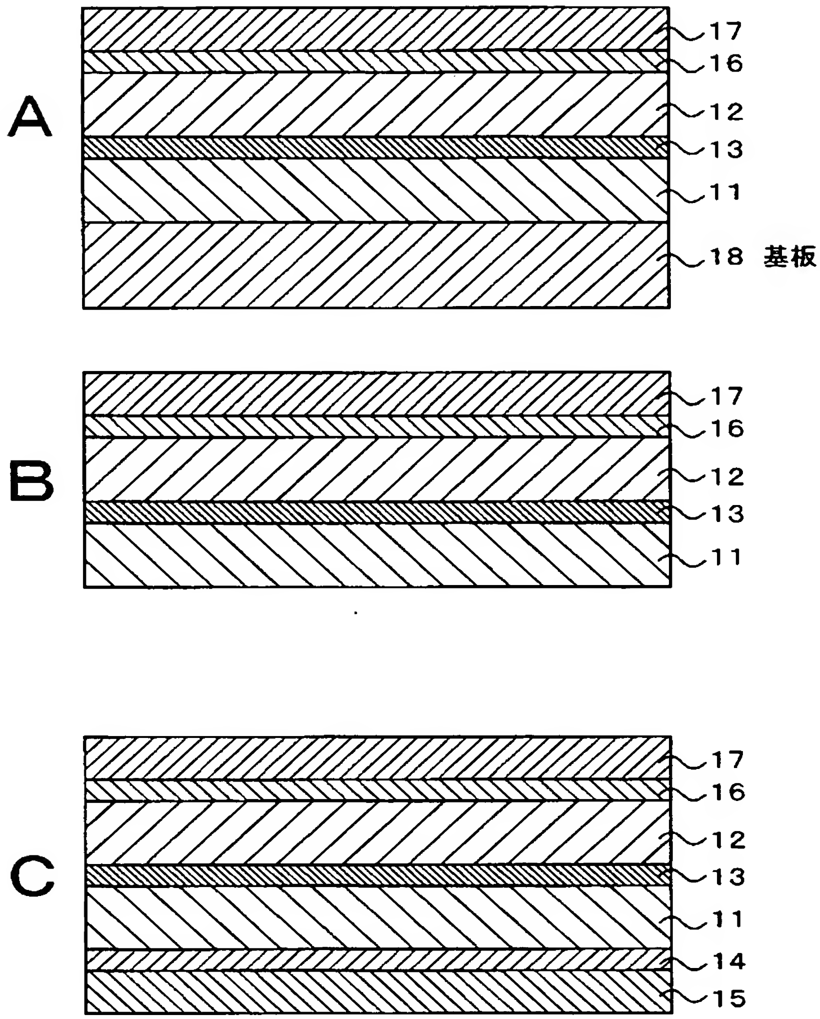
φ=-4
-2.4
-0.8
0.8
2.4
4
GOE
Poisson
Δ3(n)
n
0
0.5
1
1.5
2
5
10
15
20
25
30

【図７】

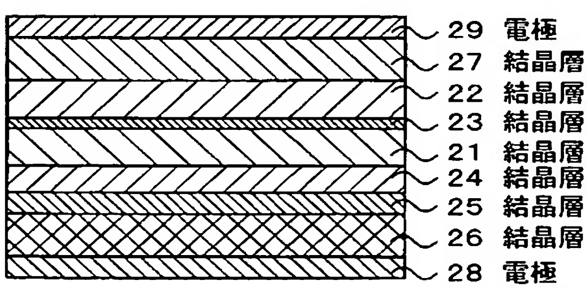


17 電極
16 絶縁膜
12 結晶層
13 結晶層
11 結晶層
14 絶縁膜
15 電極

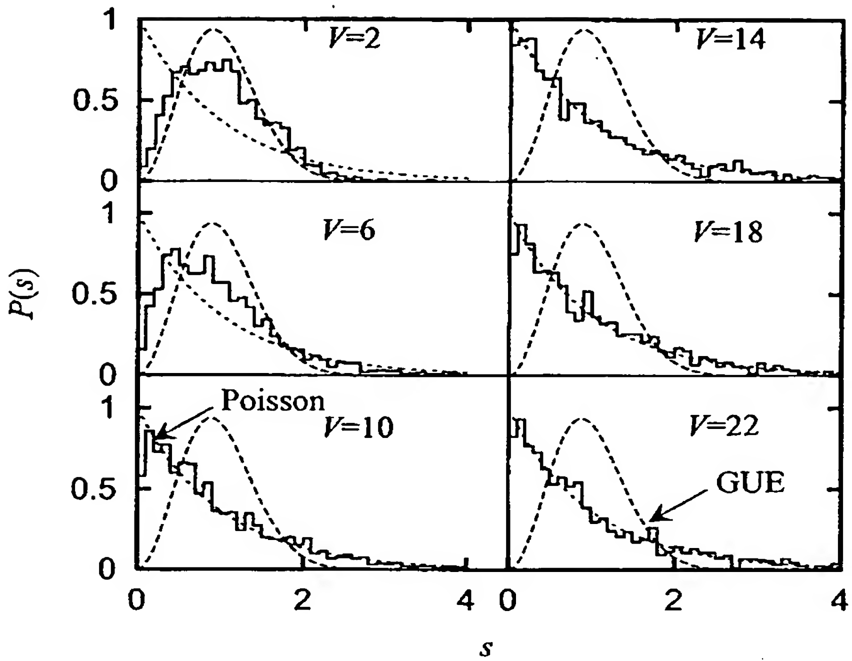
【図８】


A
17
16
12
13
11
18 基板
B
17
16
12
13
11
C
17
16
12
13
11
14
15

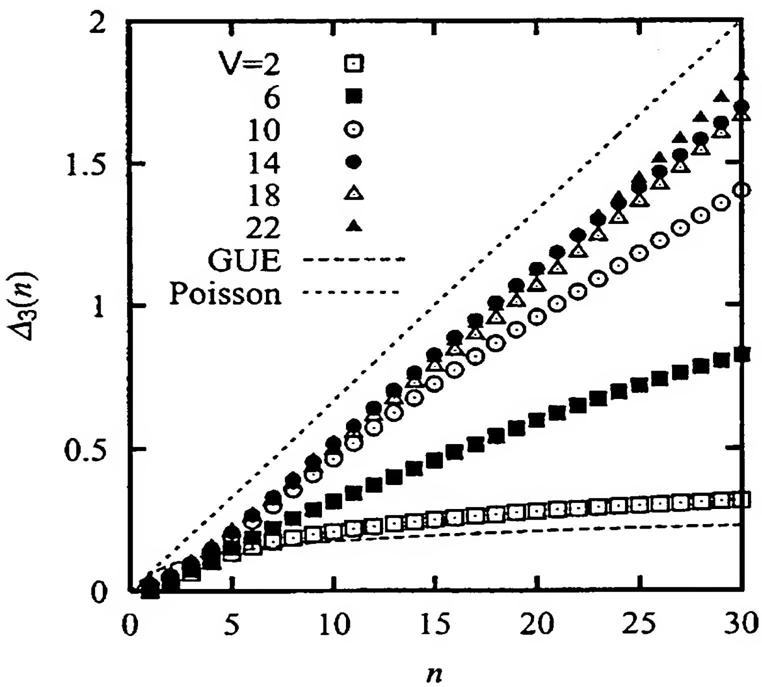
【図９】


29 電極
27 結晶層
22 結晶層
23 結晶層
21 結晶層
24 結晶層
25 結晶層
26 結晶層
28 電極

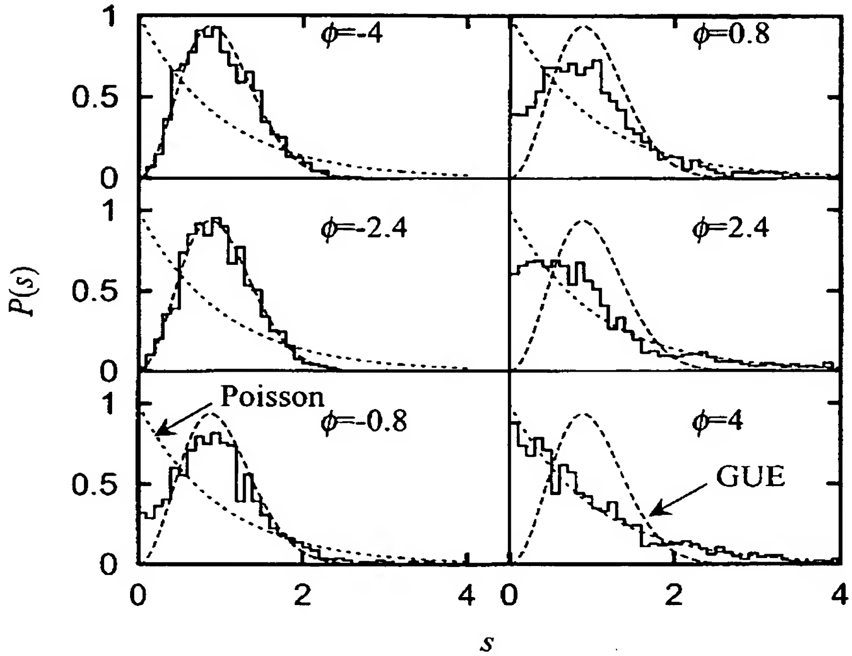
【図１０】


V=2
V=14
V=6
V=18
V=10
V=22
Poisson
GUE
P(s)
s
0
0.5
1
0
2
4

【図１１】

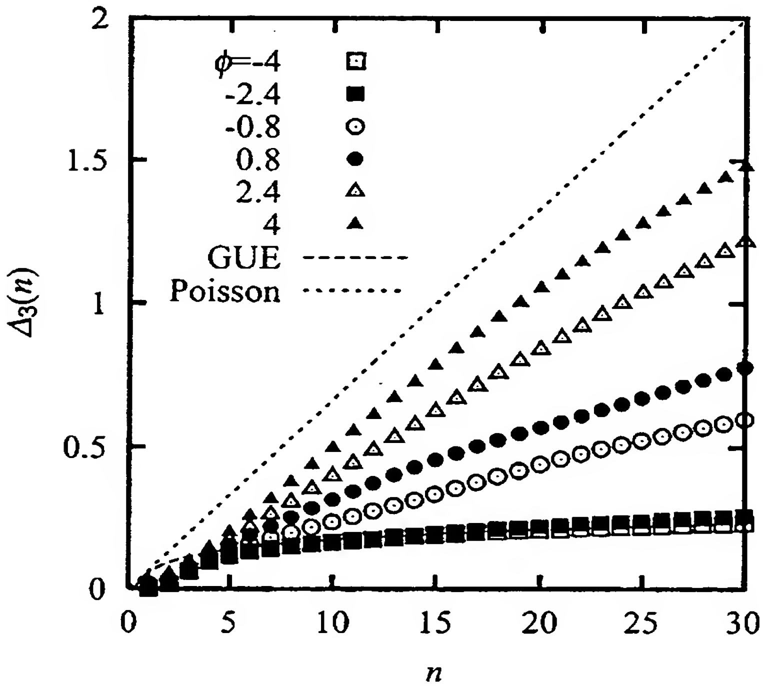

V=2
6
10
14
18
22
GUE
Poisson
Δ3(n)
n
0
0.5
1
1.5
2
5
10
15
20
25
30

【図１２】



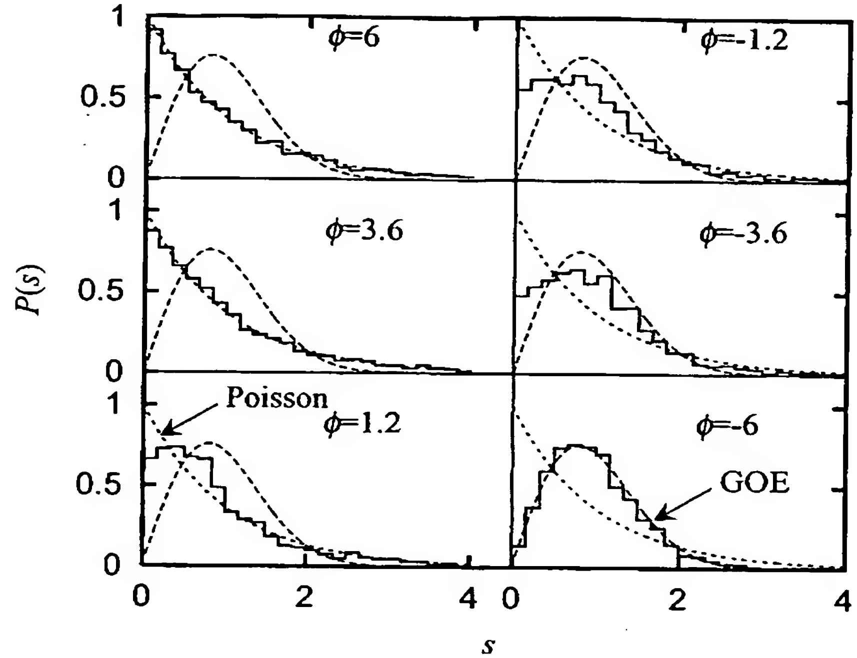
1
0.5
0
ϕ=-4
ϕ=0.8
ϕ=-2.4
ϕ=2.4
ϕ=-0.8
ϕ=4
Poisson
GUE
P(s)
0
2
4
s

【図１３】



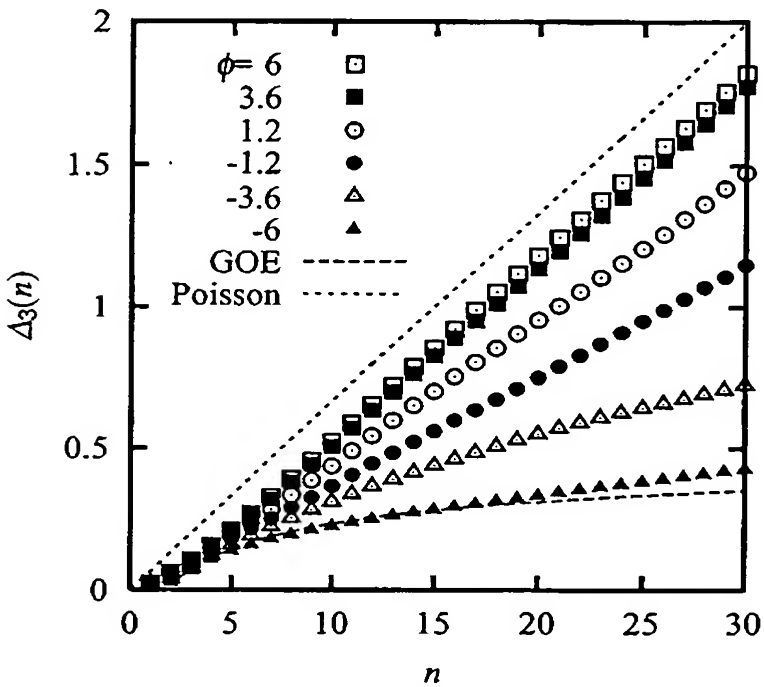
ϕ=-4
-2.4
-0.8
0.8
2.4
4
GUE
Poisson
Δ3(n)
0
0.5
1
1.5
2
0
5
10
15
20
25
30
n

【図１４】



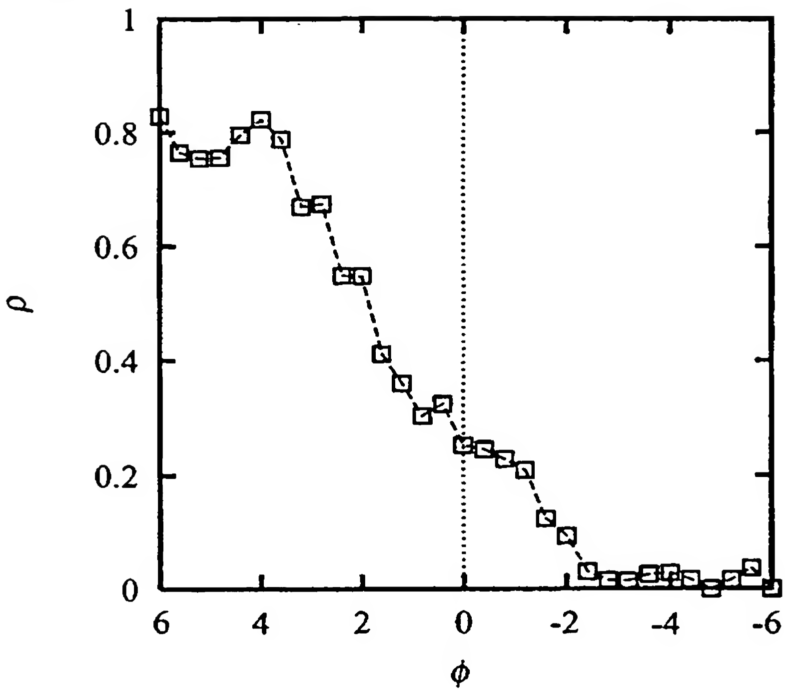
P(s)
s
ϕ=6
ϕ=-1.2
ϕ=3.6
ϕ=-3.6
ϕ=1.2
ϕ=-6
Poisson
GOE
0
0.5
1
0
2
4

【図１５】

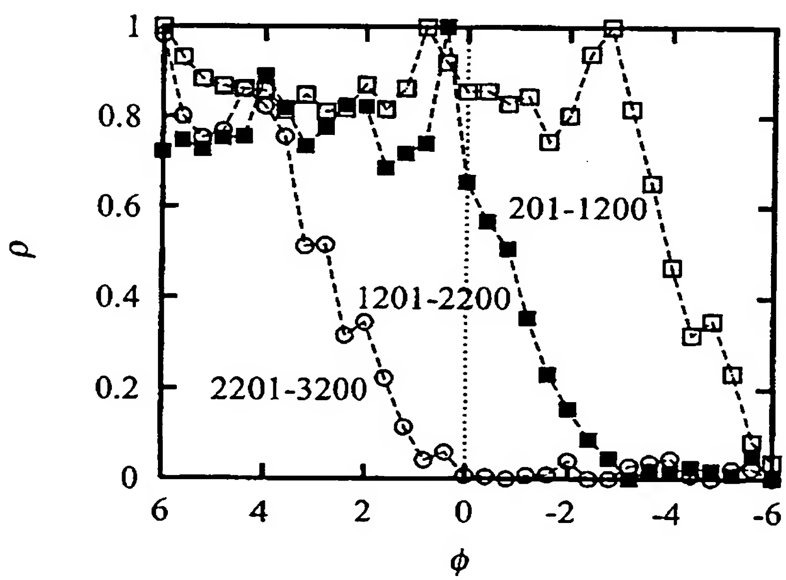


Δ3(n)
n
ϕ= 6
3.6
1.2
-1.2
-3.6
-6
GOE
Poisson
0
0.5
1
1.5
2
5
10
15
20
25
30

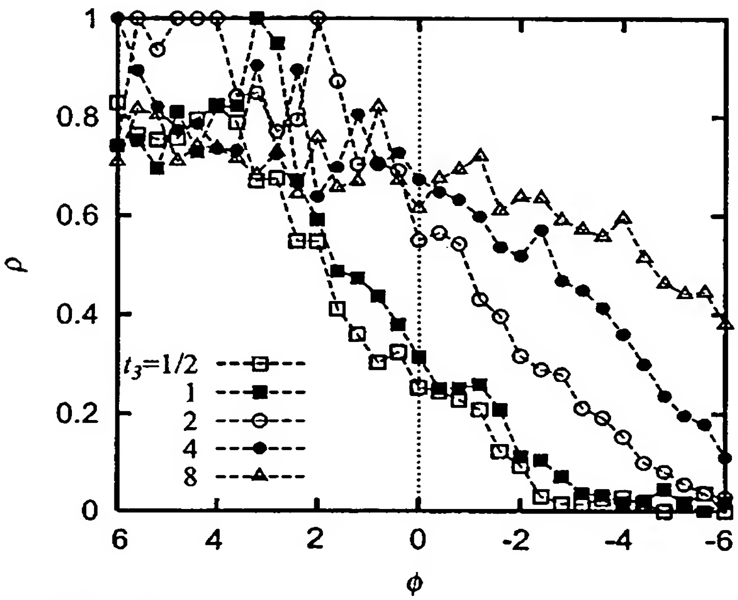
【図１６】


1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
ρ
6
4
2
0
-2
-4
-6
φ

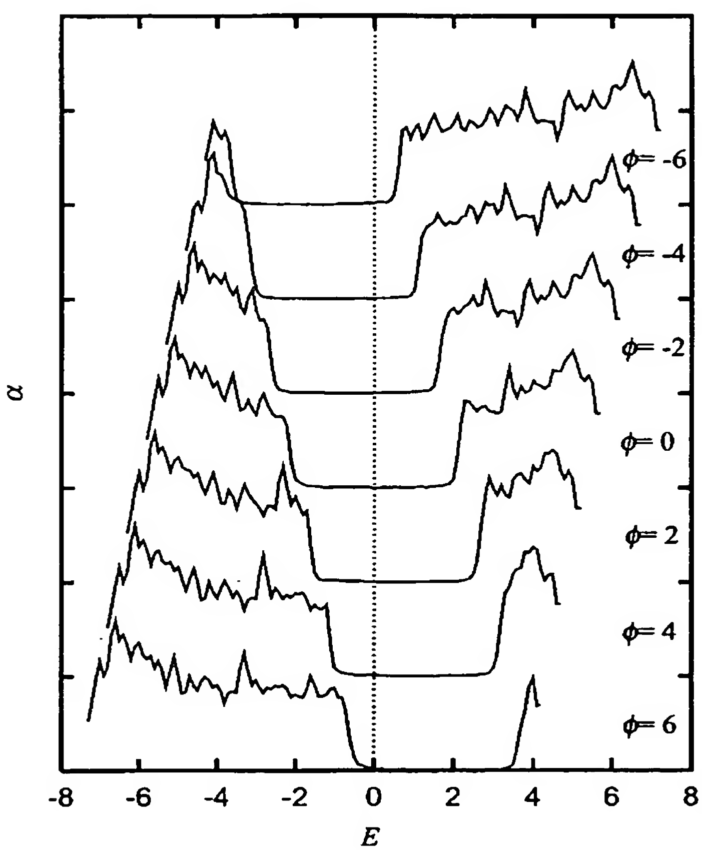
【図１７】


1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
ρ
201-1200
1201-2200
2201-3200
6
4
2
0
-2
-4
-6
φ

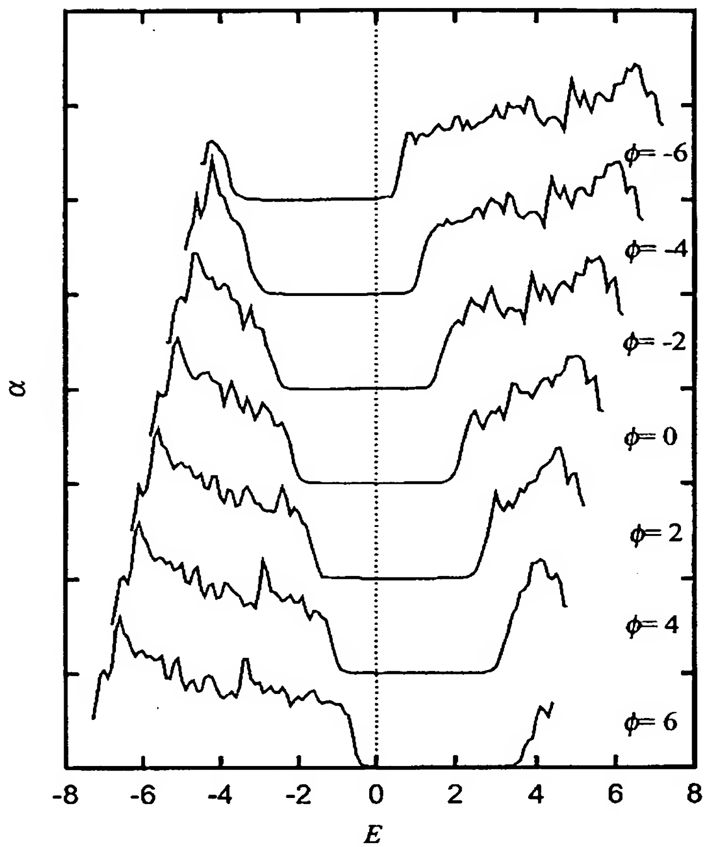
【図１８】


1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
ρ
6
4
2
0
-2
-4
-6
φ
t_3=1/2
1
2
4
8

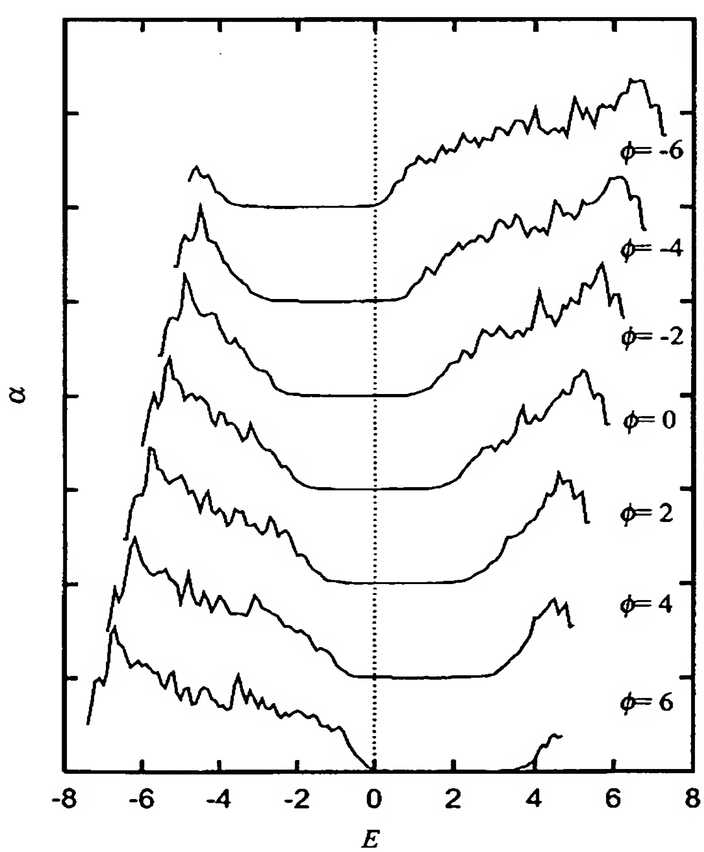
【図１９】


α
φ= -6
φ= -4
φ= -2
φ= 0
φ= 2
φ= 4
φ= 6
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
E

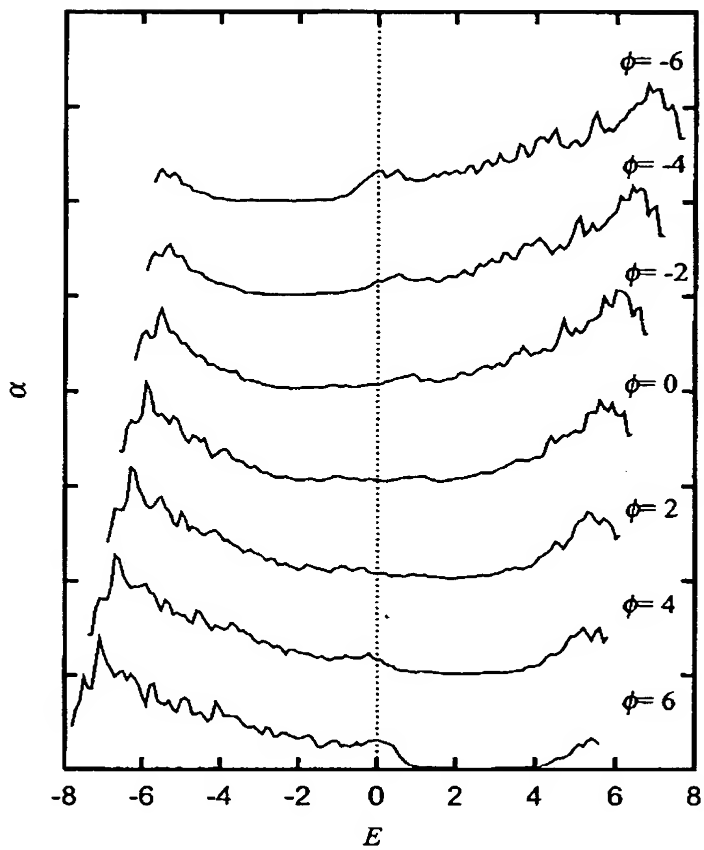
【図２０】


α
E
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
φ= -6
φ= -4
φ= -2
φ= 0
φ= 2
φ= 4
φ= 6

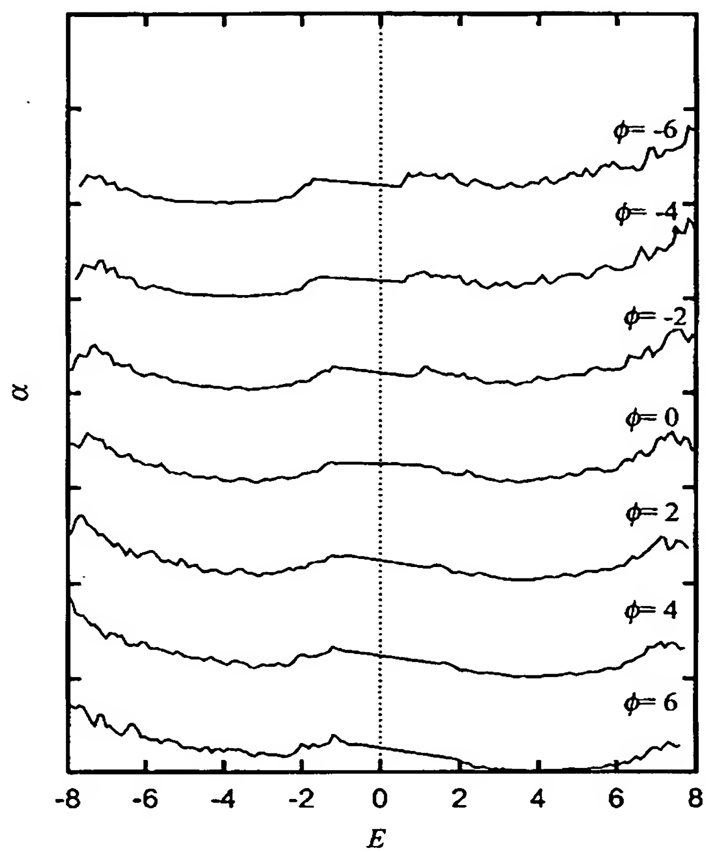
【図２１】


α
E
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
φ= -6
φ= -4
φ= -2
φ= 0
φ= 2
φ= 4
φ= 6

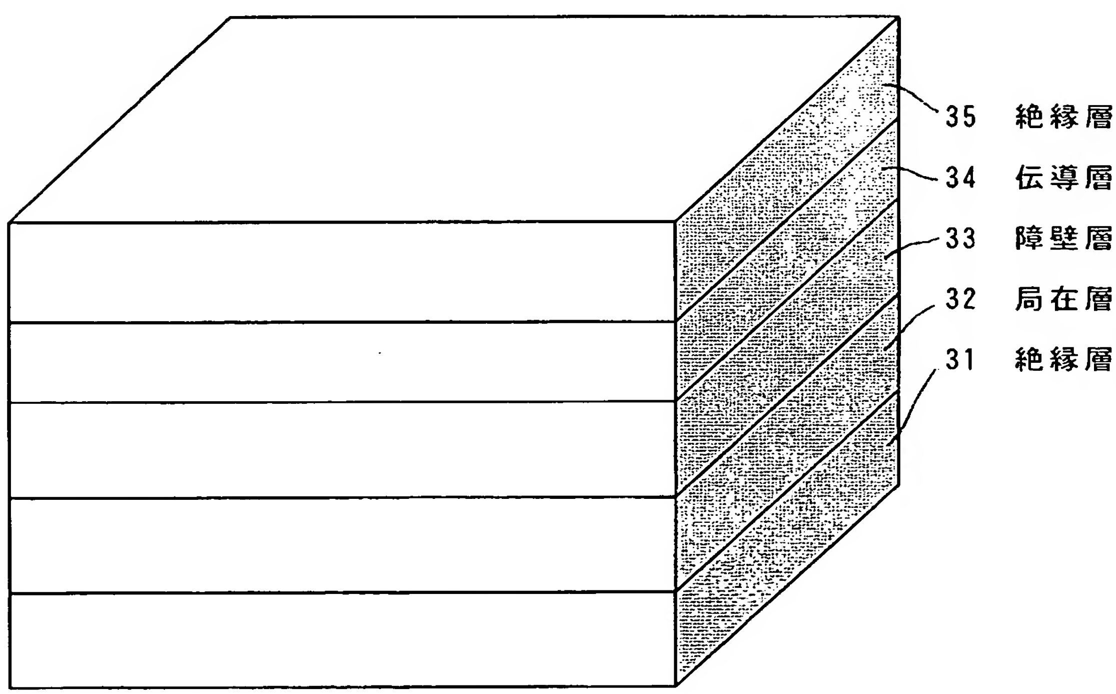
【図２２】



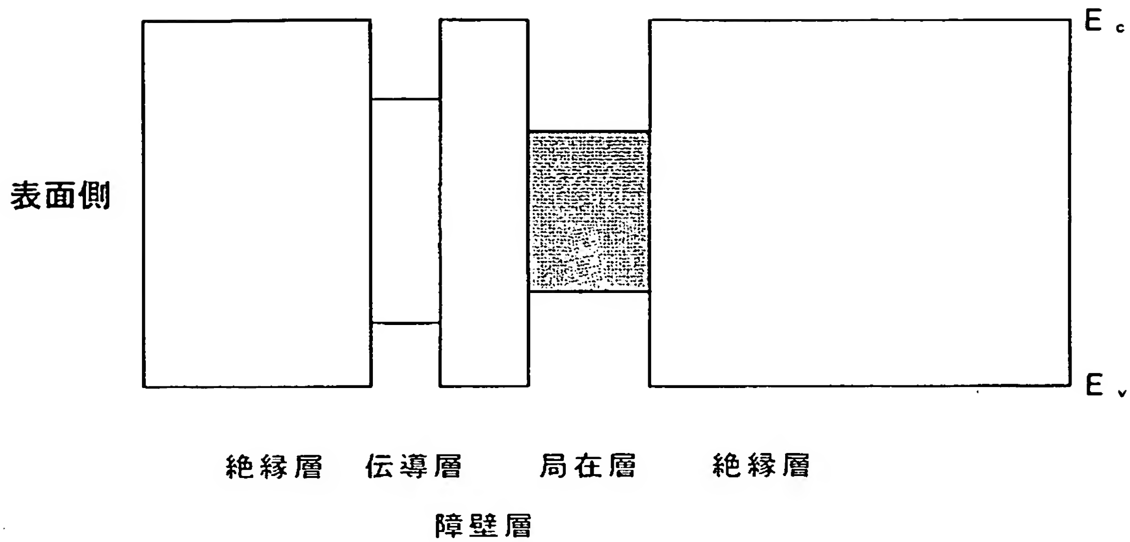
【図２３】


φ= -6
φ= -4
φ= -2
φ= 0
φ= 2
φ= 4
φ= 6
α
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
E

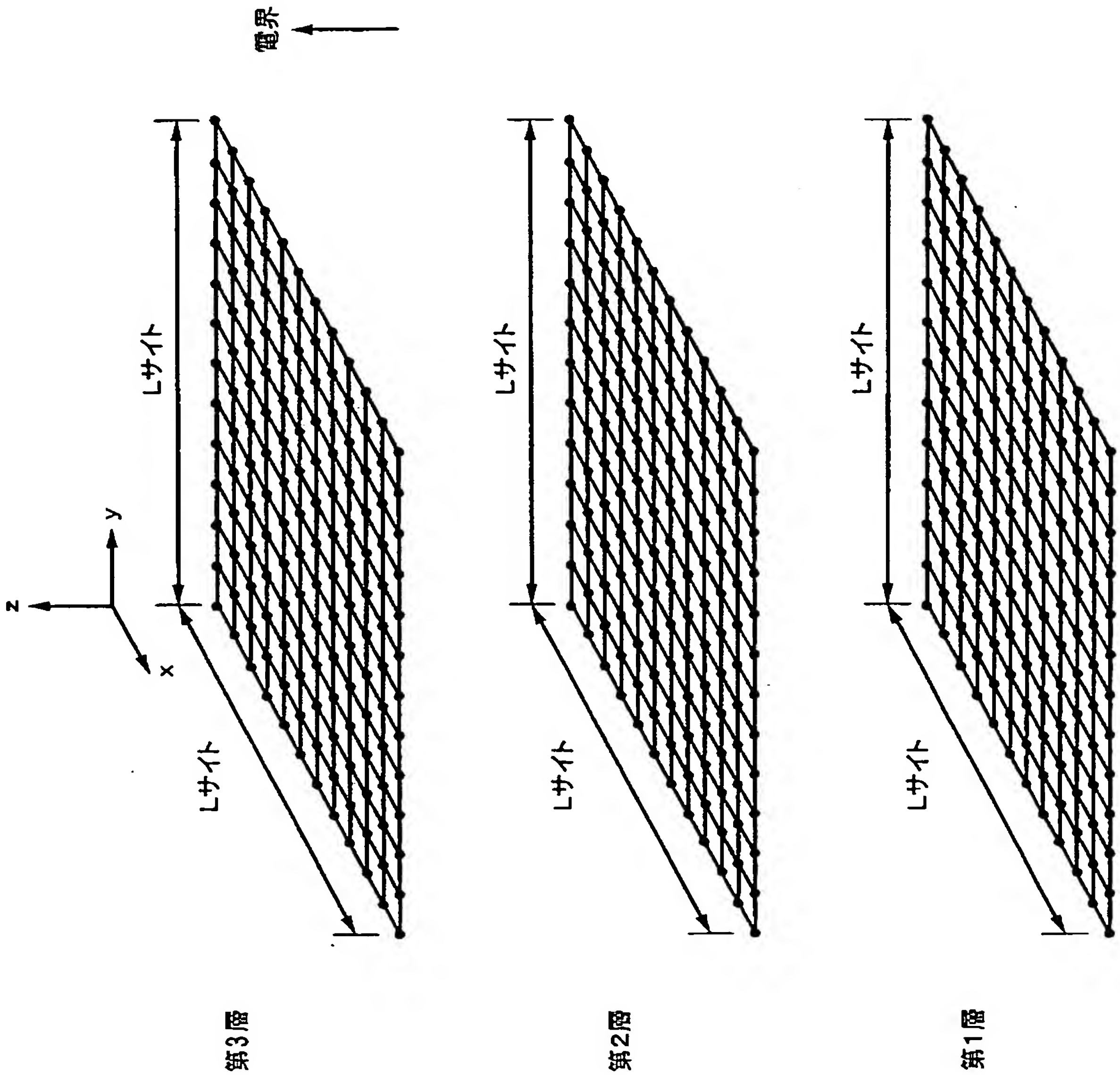
【図２４】


35 絶縁層
34 伝導層
33 障壁層
32 局在層
31 絶縁層

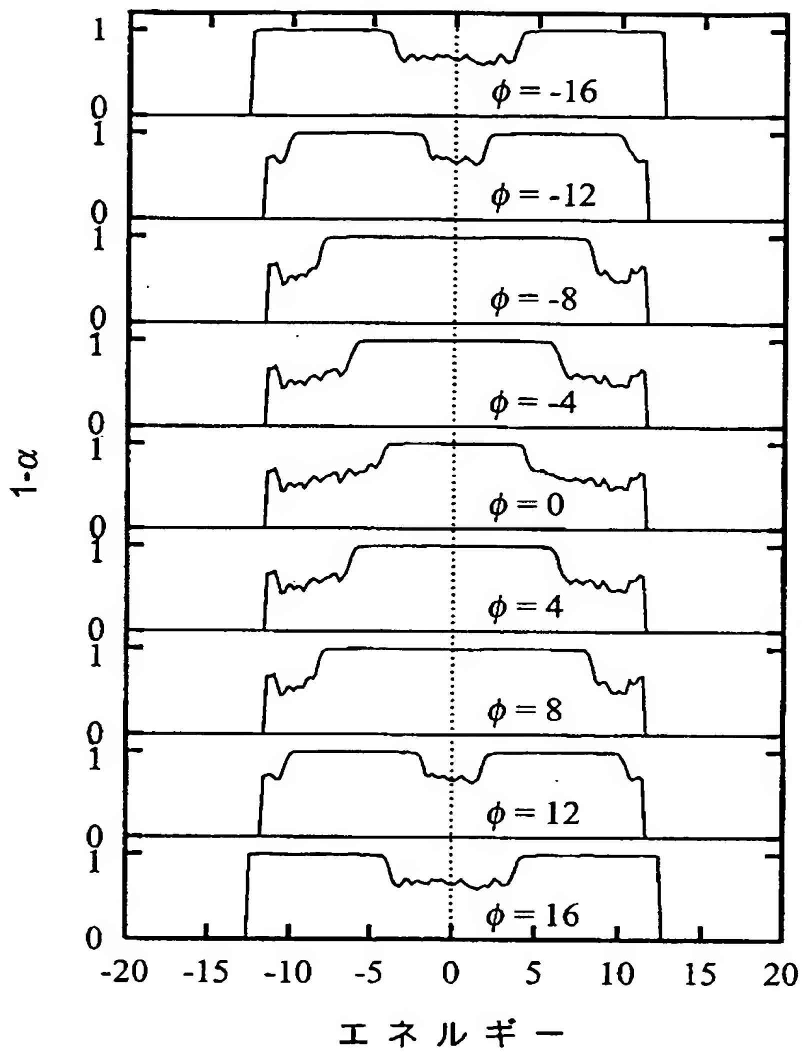
【図２５】



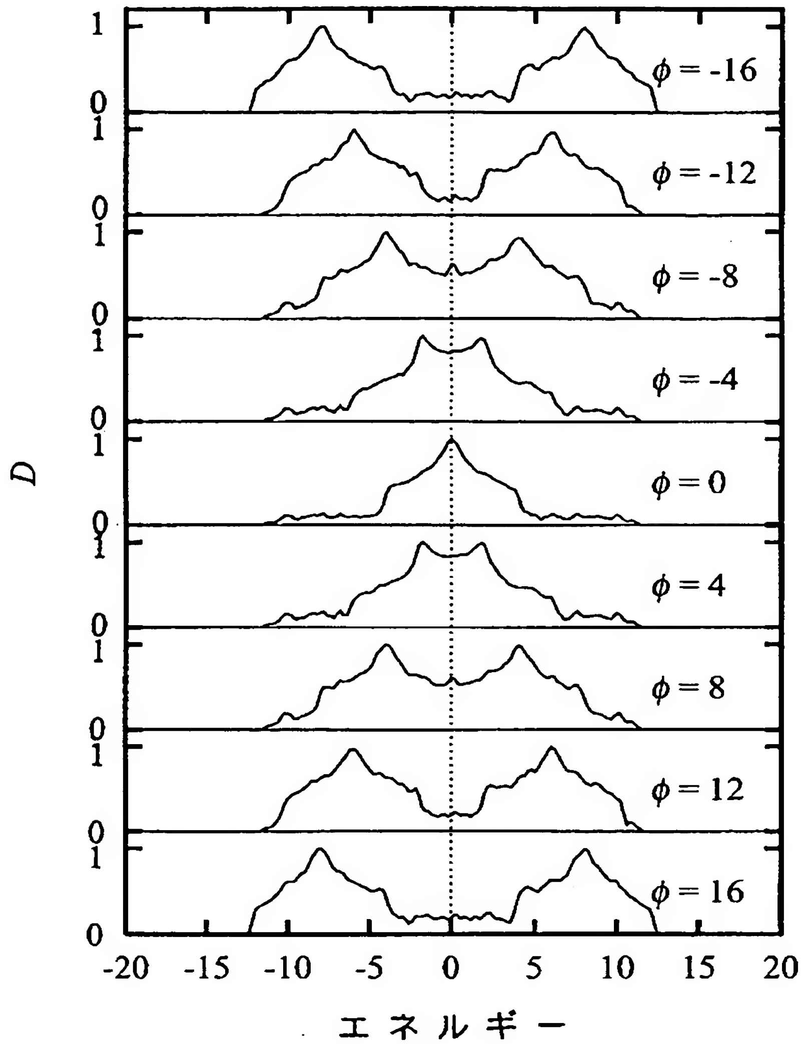
【図２６】



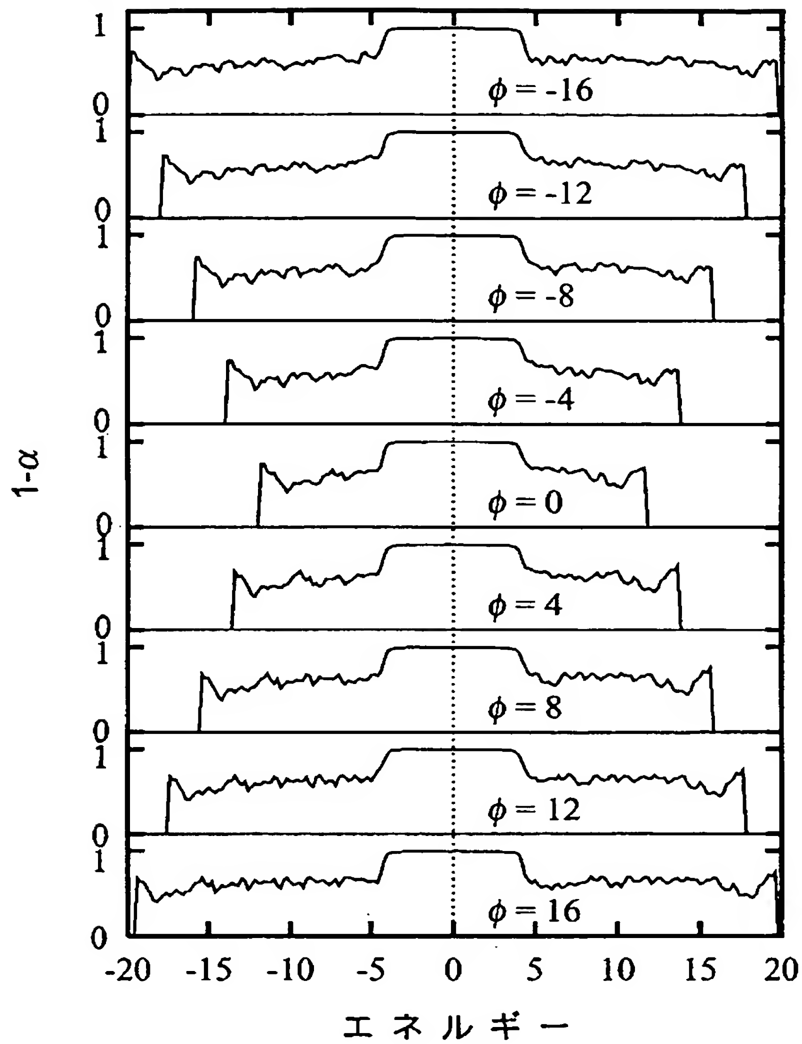
【図２７】



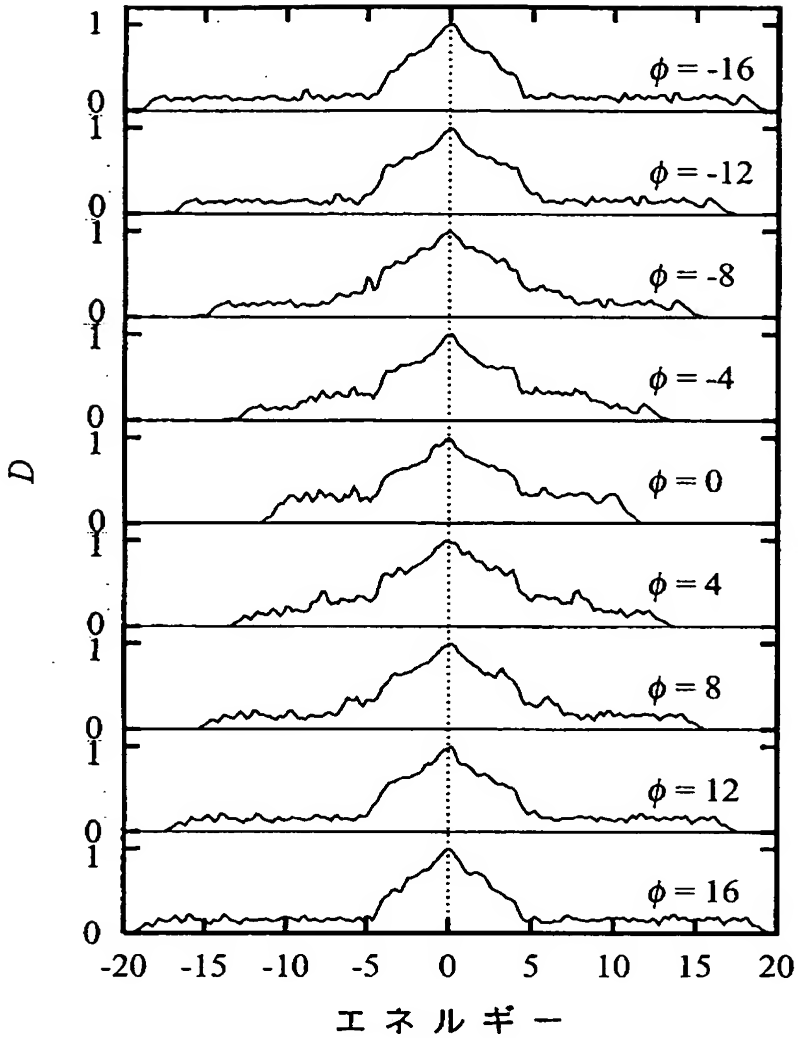
【図２８】



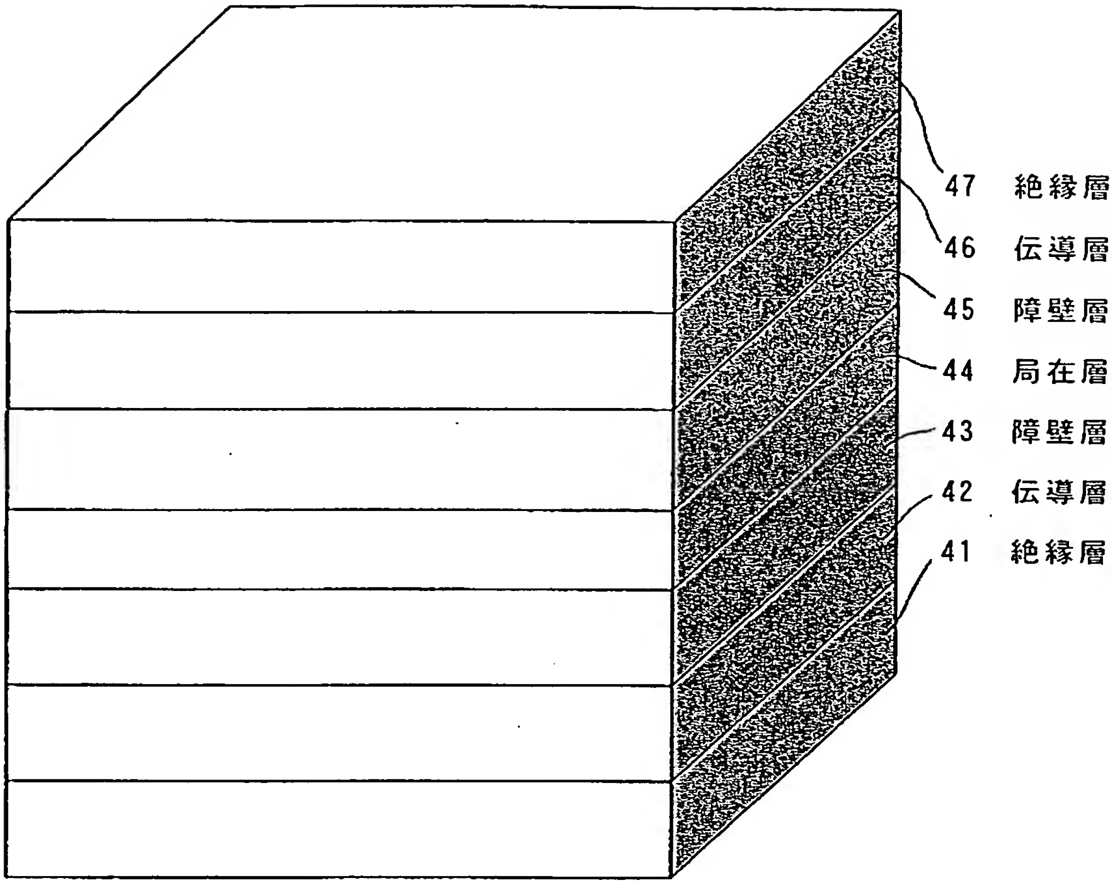
【図２９】



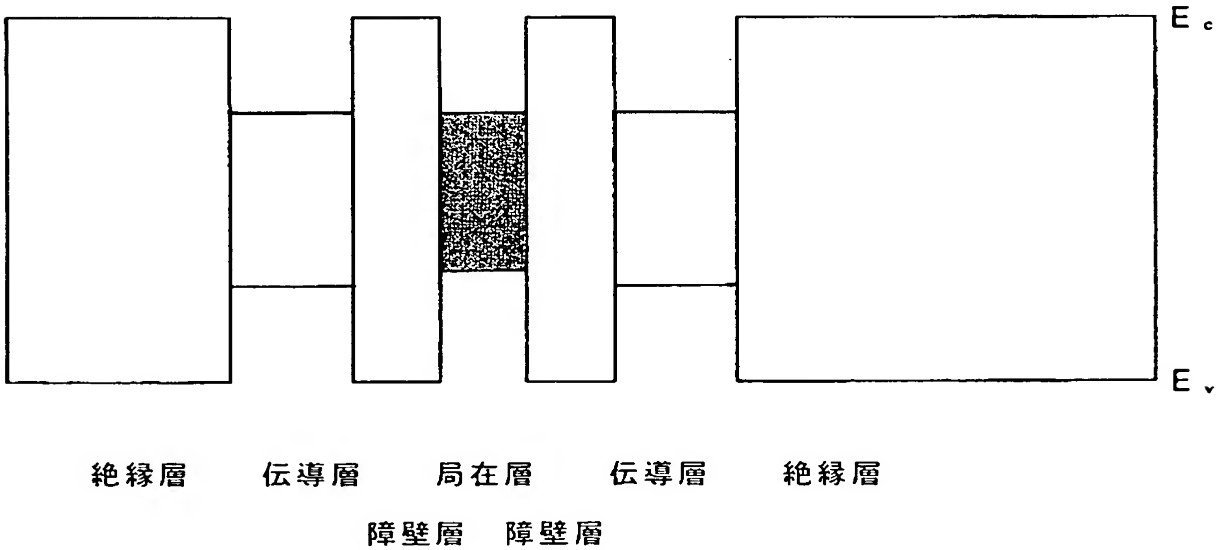
【図３０】



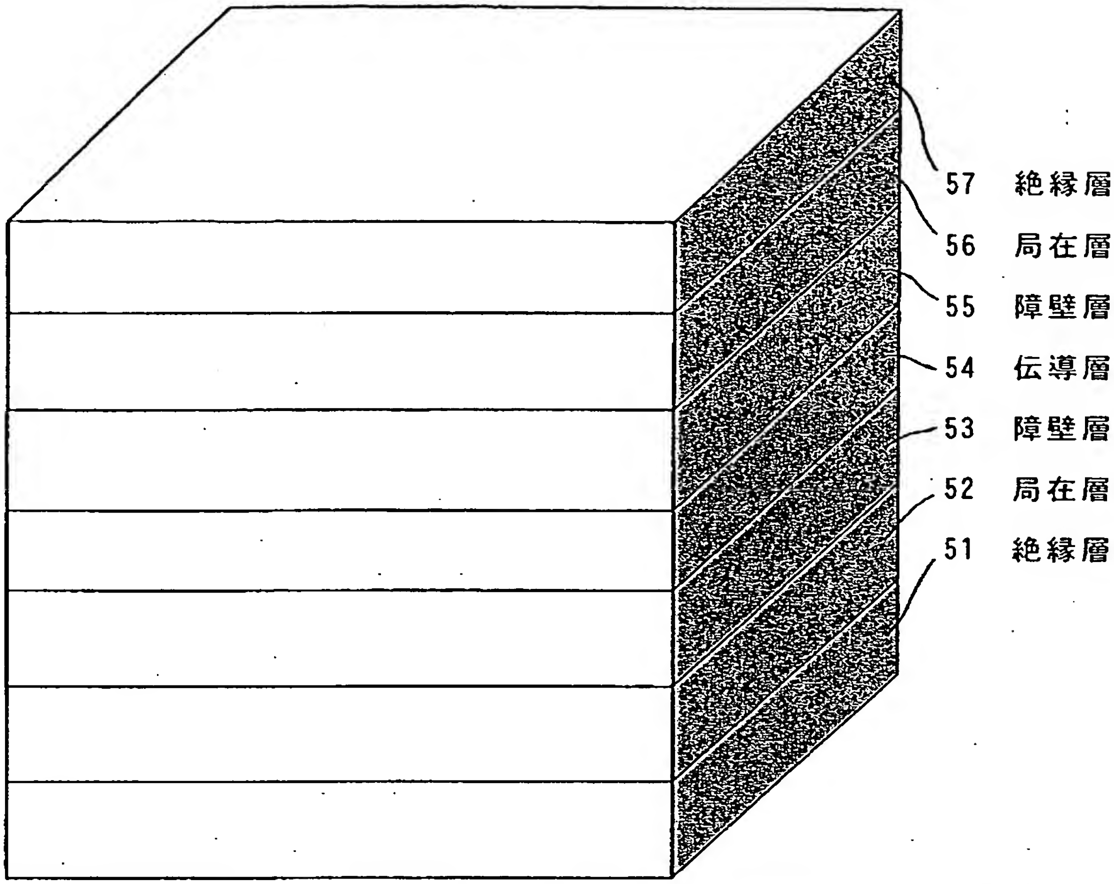
【図３１】


47 絶縁層
46 伝導層
45 障壁層
44 局在層
43 障壁層
42 伝導層
41 絶縁層

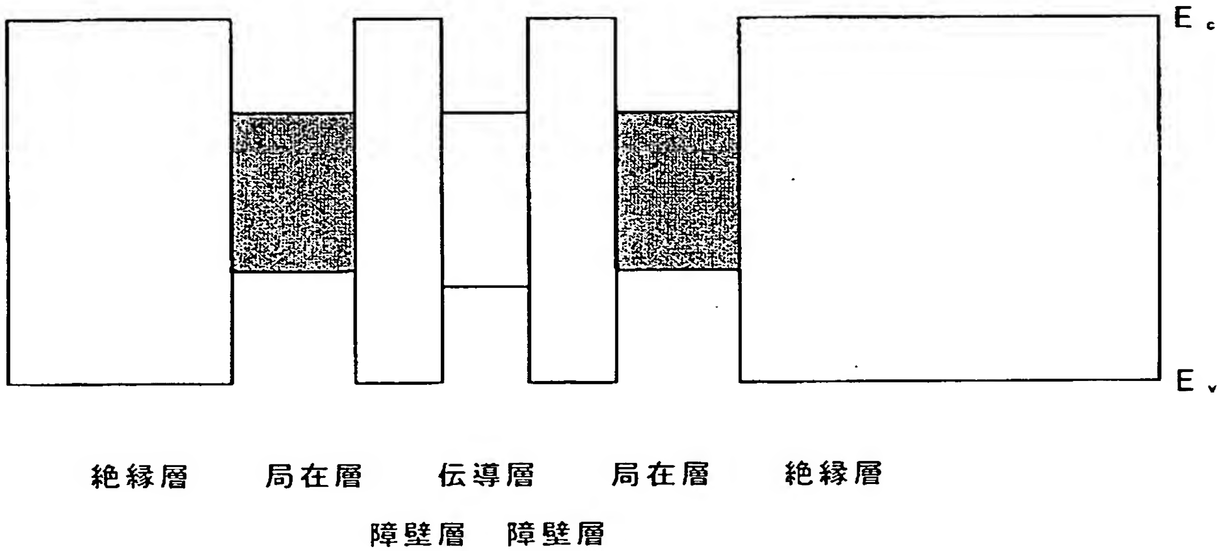
【図３２】


E c
E v
絶縁層
伝導層
局在層
伝導層
絶縁層
障壁層
障壁層

【図３３】


57 絶縁層
56 局在層
55 障壁層
54 伝導層
53 障壁層
52 局在層
51 絶縁層

【図３４】


E c
E v
絶縁層
局在層
伝導層
局在層
絶縁層
障壁層
障壁層

【書類名】要約書
【要約】
【課題】　量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができ、また単一の材料を用いてもそのような広範囲の制御が可能な量子カオス装置を提供する。
【解決手段】　量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第１の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第２の領域とを、それらの間で電子の授受が可能な状態で互いに隣接して設けてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第１の領域および第２の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する。
【選択図】　　　　図４

認定・付加情報

特許出願の番号	特願２００３－２７９９５６
受付番号	５０３０１２３３１４７
書類名	特許願
担当官	第五担当上席　　　　　００９４
作成日	平成１５年　７月３０日

＜認定情報・付加情報＞

【特許出願人】

【識別番号】	000002185
【住所又は居所】	東京都品川区北品川６丁目７番３５号
【氏名又は名称】	ソニー株式会社

【代理人】　申請人

【識別番号】	100082762
【住所又は居所】	東京都豊島区南池袋２丁目４９番７号　池袋パークビル７階　杉浦特許事務所
【氏名又は名称】	杉浦　正知

【選任した代理人】

【識別番号】	100120640
【住所又は居所】	東京都豊島区南池袋２丁目４９番７号　池袋パークビル７階　杉浦特許事務所
【氏名又は名称】	森　幸一

特願２００３－２７９９５６

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号　　　　　　　〔０００００２１８５〕

１．変更年月日　　　１９９０年　８月３０日
　　〔変更理由〕　　新規登録
　　　住　所　　　　東京都品川区北品川６丁目７番３５号
　　　氏　名　　　　ソニー株式会社